

Auswirkungen hochfrequenter Felder auf den Menschen

 Literaturstudie



IMPRESSUM

- Herausgeber** Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
76157 Karlsruhe · Postfach 21 07 52
www.lfu.baden-wuerttemberg.de
Referat 33 · Luftqualität, Lärm, Verkehr
Dezember 2003
- Bearbeitung** Prof. Dr.-Ing. habil. med. Jiri Silny
RWTH Aachen, Forschungszentrum für
Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit (femu)
52074 Aachen · Pauwelsstr. 30
www.femu.de
- Bezug** www.lfu.baden-wuerttemberg.de/lfu/uis/strahlung.html

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung und Diskussion.....	4
2. Einleitung.....	7
3. Auswahl der Literatur und Strukturierung der Literaturstudie	9
4. Hochfrequente Felder im Alltag	11
4.1 Relevante Charakteristika.....	11
4.2 Quellen.....	12
4.3 Wirkungsmechanismen hochfrequenter Felder	14
4.4 Empfehlungen und Verordnungen	14
4.5 Messungen der Feldstärken im Alltag.....	16
4.6 Immission.....	19
4.7 Zusammenstellung der Emissions- und Immissionsdaten	22
5. Arten und Aussagekraft biologisch-medizinischer Untersuchungen.....	26
5.1 Epidemologische Studien.....	26
5.1.1 Arten der epidemiologischen Untersuchung	26
5.2 Provokationsstudien.....	27
5.3 Tierexperimente	27
5.4 Reagenzglasuntersuchungen (in vitro)	28
6. Krebsrisiko in hochfrequenten Feldern	29
6.1 Aspekte des Krebsgeschehens.....	29
6.2 Epidemiologische Studien zum Krebsrisiko bei Nutzern von Mobilfunk-Handys	30
6.3 Einfluss von Mikrowellen auf die Karzinogenese in Tierexperimenten	34
6.3.1 Spontanes Tumorwachstum	34
6.3.2 Chemisch oder durch Strahlen initiierte Tumoren	36
6.4 In vitro-Experimente	39
6.4.1 Zytogenetische Studien.....	41
6.4.2 Chromosomenaberrationen und Induktion von Mikrokernen	42
6.4.3 DNA-Brüche	45
6.4.4 Genmutation und -expression	46
6.5 Diskussion von Studien zum Krebsgeschehen	47
7. Das Zentralnervensystem (ZNS) in den hochfrequenten Feldern	51
7.1 Relevanz und Verfahren	51
7.2 Epidemiologische Studien zu gesundheitlichen Beschwerden durch Mobilfunkfelder	52
7.3 Beeinflussung kognitiver Funktionen	54
7.4 Einfluss auf das Verhalten in Tierexperimenten.....	57
7.5 Einfluss hochfrequenter Felder auf den menschlichen Schlaf	59
7.6 EEG unter der Einwirkung von Mikrowellen.....	62
7.7 Kalziumhaushalt des Hirngewebes	66
7.8 Blut-Hirn-Schranke.....	66
7.9 Neuroendokrines System und Hormone	68
8. Einfluss hochfrequenter Felder auf Sinnesrezeptoren.....	72
9. Einfluss hochfrequenter Felder auf elektronische Implantate.....	74
10. Sonstige Studien.....	77
11. Literaturverzeichnis.....	78
11.1 Literaturverzeichnis zu Kapitel 4	78
11.2 Literaturverzeichnis zu den Kapiteln 5 bis 10.....	80

1. Zusammenfassung und Diskussion

In der Öffentlichkeit werden mutmaßliche gesundheitsrelevante Effekte elektromagnetischer Felder vehement diskutiert. Viele Bürger machen sich Sorgen oder ängstigen sich sogar vor möglichen gesundheitlichen Schäden durch die sinnlich meist nicht wahrnehmbaren und dennoch allgegenwärtigen Felder. Insbesondere den neuen Mobilfunkfeldern wird z.B. eine krebsfördernde oder zumindest subjektive Beschwerden auslösende Wirkung angelastet. Oft werden sie sogar als Ursache vieler Erkrankungen bezeichnet.

Die Beurteilung des tatsächlichen und aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes geschieht hier auf Grundlage der weltweiten Literatur aus "peer-reviewed" Fachzeitschriften sowie vollständigen wissenschaftlichen Arbeitsberichten; bei "peer-reviewed" handelt sich um solche Fachzeitschriften, deren Redaktionen jeden einzelnen Beitrag von mehreren Experten unabhängig voneinander überprüfen lassen.

Die behandelte Problematik umfasst sowohl technische als auch medizinisch-biologische Aspekte. Aus Publikationen mit technisch-dosimetrischer Ausrichtung wird die Charakterisierung der uns umgebenden hochfrequenten Felder entnommen. Diese stellt eine wichtige Basis sowohl für die Deutung unterschiedlicher Befunde als auch für den Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit der Situation im Alltag dar.

Als belegte Wirkungsmechanismen hochfrequenter Felder auf den Organismus weist die Literatur nur Wärmewirkungen aus. Eine geringe Erwärmung des Körpers im Bereich von wenigen Zehntel Grad Celsius durch die Felder kann akzeptiert werden, da sie nur einen kleinen Bruchteil des grundlegenden Wärmeumsatzes im Körper darstellt. An diesem Kriterium orientieren sich auch die Empfehlungen und Verordnungen zum Schutz der Bevölkerung gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern.

Die in der Praxis vorherrschenden Felder wurden insbesondere in der Umgebung von Mobilfunksendern von unterschiedlichen Gruppen sehr häufig und sehr detailliert gemessen. Die Messergebnisse zeigen, dass die im Alltag vorkommenden Feldstärken nur einen Bruchteil der Grenzwerte der gesetzlichen Schutzverordnung erreichen.

Den größten Umfang bei der Erforschung möglicher biologisch-medizinischer Effekte der hochfrequenten Felder nehmen die Untersuchungen zur Einflussnahme auf das Krebsgeschehen ein. Eine Reihe von epidemiologischen Studien, Tierexperimenten und Reagenzglasuntersuchungen beschäftigen sich mit der Wirkung von analogen und digitalen Mobilfunkfeldern auf die so genannte Kanzerogenese. Auf diese Weise werden die komplexen Vorgänge der Krebsinitiation und -promotion auf verschiedenen Integrationsstufen auf der Ebene der einzelnen Zelle und der Ebene der Zellvermehrung überprüft. Bei einem eindeutigen Effekt müssten sich die Ergebnisse aus allen drei Untersuchungsarten gegenseitig bestätigen.

Die epidemiologischen Studien zeigen in ihrer Gesamtheit keine erhöhte Häufigkeit für unterschiedliche Krebserkrankungen. Die in einigen wenigen Studien ermittelten Zunahmen des relativen Risikos, z.B. für Augentumoren, lassen sich auf zu kleine Gruppen bei den untersuchten Probanden und Patienten sowie auf eine unsichere Dosimetrie zurückführen.

Auch die Betrachtung einer möglichen Relation zwischen Kopfseite der Handynutzung und Kopfseite des aufgetretenen Tumors liefert keinen statistischen Zusammenhang, wenn die Ergebnisse aus der gegenseitigen Zuordnung richtig bewertet werden.

Allerdings wurden bei den epidemiologischen Studien bisher vor allem Mobilfunkfelder der früheren, analogen Funktionsweise berücksich-

tigt, die mit ihrem mehr als 20-jährigen Einsatz und dem Vorhandensein von Krebsregistern in skandinavischen Ländern eine geeignete Grundlage für die retrospektive epidemiologische Bewertung darstellen.

Diejenigen Studien, die sowohl digitale als auch analoge Mobilfunksysteme berücksichtigen, zeigen meist für analoge Handys eine schwache und für digitale Handys keine Erhöhung des relativen Risikos. Für eine abschließende Bewertung des GSM-Mobilfunks wird erst in einigen Jahren ausreichendes Material zur Verfügung stehen. Die gleiche Fragestellung betrifft auch die UMTS-Technik, den Mobilfunk der Dritten Generation, der sich in der Einführungsphase befindet. Um sich zeitaufwändige und kostspielige Forschungsprogramme zu ersparen, ist eine Abklärung erforderlich, ob die GSM- oder UMTS-Mobilfunkfelder aufgrund ihrer Modulation anders wirken als analoge Mikrowellen. Bisher gibt es allerdings keinerlei Hinweise auf derartige Wirkungen oder Wirkungsmechanismen.

Zur Überprüfung eventueller, auch geringfügiger Effekte wurden Tiermodelle mit spontaner und chemischer bzw. strahleninduzierter Tumorbildung verwendet. Die Mehrheit der Experimente konnte keine promovierende Wirkung der Mobilfunkfelder zeigen. Nur eine Studie mit spezifisch genetisch veränderten Tieren zeigt einen schwachen Anstieg der Tumorfrequenz in den befeldeten Gruppen. Die Wiederholung dieser Studie mit leicht verändertem Design, aber wesentlich größeren Gruppen vergleichbarer transgener Tiere, zeigte dagegen keine Evidenz für eine tumorpromovierende Wirkung des Feldes.

Eine Reihe von in vitro-Untersuchungen setzt sich mit Effekten hochfrequenter Felder auf die Zellteilung und DNA-Schäden auseinander. Die Resultate sind inkonsistent und zeigen keinen einheitlichen Befund, der für die Ausrichtung der weiteren Forschung dienlich sein könnte. Vieles deutet darauf hin, dass die z.T. sich widersprechenden Ergebnisse nur ein Ausdruck der im Reagenzglas zwangsläufig auftretenden großen biologischen Schwankungen sind. Insgesamt betrachtet lässt sich aus allen publizierten Untersuchungen keine Evidenz für eine initierende

oder promovierende Wirkung der applizierten Mikrowellen ableiten.

Subjektive Beschwerden wie z.B. Kopfschmerzen, Migräne, Schlaflosigkeit oder Müdigkeit werden häufig auf die Existenz von Mobilfunkfeldern zurückgeführt. In mehreren epidemiologischen Untersuchungen und Provokationsstudien wird der Frage nachgegangen, ob sich dieser Zusammenhang bestätigen lässt. Arbeiten mit kontrollierter Exposition können diesen Zusammenhang nicht bestätigen, wogegen Studien mit Feldermittlung im Alltag durchaus schwache Tendenzen für eine Beeinträchtigung in der Nähe der Sender liefern.

Der Einfluss von Mobilfunkfeldern auf die kognitiven Funktionen sowie auf verschiedene Leistungen des Zentralnervensystems (ZNS) wird in Untersuchungen mit Probanden und in Tierexperimenten verfolgt. In Übereinstimmung mit früheren Ergebnissen ergeben auch die meisten neuen Arbeiten nur eine geringe Verbesserung der kognitiven Leistungen von Probanden, aber keine Defizite bei der Exposition mit Mikrowellen der Mobilfunksysteme. Als eine denkbare Ursache für diese Effekte wird eine lokale Erwärmung des Gehirns diskutiert.

Dagegen liefern Tierexperimente keine eindeutige Bestätigung für eine positive oder negative Beeinflussung der Lern- und Gedächtnisleistungen durch Mobilfunkfelder in der Stärke, wie sie beim Gebrauch heutiger Handys entstehen.

Beschwerden zur Beeinträchtigung der Schlafqualität durch die Mobilfunkfelder werden in Laboruntersuchungen überprüft. Zur Beurteilung werden Abfragen der Probanden sowie das EEG herangezogen. Dabei kommen stärkere Felder zum Einsatz, als sie von Basisstationen in Wohn- und Schlafräumen aufgebaut werden. Eine der früheren Studien hat eine Verkürzung der Traumphase (REM) ergeben, eine Wiederholung dieser Untersuchungen durch dieselbe Gruppe hat dieses Ergebnis allerdings nicht bestätigt. Auch durch jüngere Studien kann die Einflussnahme der Mobilfunkfelder auf die Schlafqualität nicht belegt werden.

Eine Reihe von Untersuchungen mit Probanden oder Tieren zielt auf Veränderungen, für die bisher kein Endpunkt (Wahrnehmung, Beeinträchtigung oder Erkrankung) aufgezeigt werden kann. Hierzu gehören Einflüsse auf das Wach-EEG und andere elektrophysiologische Signale und auf das neuroendokrine System. Auch hier ist die Befundlage uneinheitlich und erlaubt keine Schlussfolgerungen.

Dagegen müssten tatsächlich vorhandene Wirkungen der hochfrequenten Felder auf den Kalziumhaushalt der Zellen oder eine Beeinträchtigung der Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke zu massiven Einflüssen auf die vitalen Funktionen des Organismus führen. Derartige Befunde liegen aber nicht vor. Es obliegt weiteren Untersuchungen, diese Unsicherheiten zu klären und zu zeigen, ob es sich um schwache Effekte oder nur um Artefakte handelt.

Zur Beeinträchtigung der Sinnesrezeptoren, insbesondere der Augen, kann es nur kommen, wenn sehr starke Felder einwirken. Derart starke Mikrowellenfelder kommen im Alltag nicht vor.

Weitere Untersuchungen zur Störung elektronischer Implantate haben bestätigt, dass nur Handys eine direkte Beeinflussung verursachen können, wenn sie in unmittelbarer Nähe (< 10 cm) des Implantats gehalten werden. Die Felder der Mobilfunk-Basisstationen sind in keiner Alltagssituation imstande, elektronische Implantate zu beeinflussen.

Der aktuelle Wissenstand vermittelt keinerlei Hinweise auf eine akute Gesundheitsgefahr, die von den im Alltag vorhandenen hochfrequenten Feldern ausgehen könnte. Es werden einige subtile Effekte gemeldet, deren Überprüfung nur in aufwändigen Studien möglich ist. Eventuelle Langzeitwirkungen können nicht ausgeschlossen werden, auf der Basis des heutigen Wissens sind sie aber sehr unwahrscheinlich.

2. Einleitung

Die Zahl der Anwendungen mit einer Emission hochfrequenter Felder in der unmittelbaren Umgebung des Menschen nahm insbesondere im letzten Jahrzehnt im Alltag wie im Beruf rapide zu. Die stürmische Einführung dieser neuen Technologien wurde maßgeblich durch die fast flächendeckende Einführung des digitalen Mobilfunks in D- und E-Netzen und die große Akzeptanz in der Bevölkerung getragen. Es ist zu erwarten, dass sich dieser Trend mit neuen Applikationen der drahtlosen Kommunikation fortsetzen wird. WLAN (Wireless Local Area Network) oder Bluetooth sind die heutigen Repräsentanten dieser neuen Techniken, die vor allem in der drahtlosen Kommunikation zwischen Komponenten von Rechnersystemen und Netzwerken Anwendung finden.

Ein gemeinsames Merkmal der bei all diesen technischen Anwendungen aufgebauten elektromagnetischen Felder ist, dass sie im Mikrowellenbereich angesiedelt sind und unterschiedliche Arten einer digitalen Kodierung der zu übertragenden Information, oder technisch ausgedrückt, digitalen Modulationen, aufweisen.

Weitere Merkmale dieser Techniken sind, dass sie zwar einerseits mit niedrigen Leistungen bis zu einigen 10 W arbeiten, aber andererseits nah oder gar direkt am menschlichen Körper betrieben werden können.

Auch die zur Zeit neu eingeführten digitalen Fernseh- und Rundfunksysteme werden die qualitativen Vorteile dieser Art von Informationsübertragung nutzen und eine weitere Quelle gepulster Mikrowellen darstellen.

Obgleich die neuen Technologien breiten Zuspruch in der Gesellschaft finden, insbesondere bei der Jugend, sieht zumindest ein Teil der Bevölkerung seine gesundheitlichen Beschwerden in Zusammenhang mit der Einführung der pulsmodulierten elektromagnetischen Felder. Obwohl wir seit mehr als 30 Jahren den Mikrowellen der Fernseh- und Rundfunksender exponiert

werden, ohne dass besondere Wechselwirkungen dieser Felder mit dem Organismus gemeldet oder festgestellt wurden, wird die Ursache dieser neuerlichen gesundheitlichen Beschwerden auf die so genannten niederfrequent modulierten Mikrowellen zurückgeführt. Es werden Mutmaßungen über den Zusammenhang dieser Felder und subjektiven Beschwerden wie z.B. Kopfschmerzen, Migräne oder Schlafstörungen und sogar der Begünstigung einer Krebsentwicklung durch die Langzeiteinwirkung des Mobilfunks angestellt. Dabei sollen Kinder und Kranke oder ältere Menschen angeblich einem höheren Risiko ausgesetzt sein.

Die Wissenschaft hat sich in den vergangenen beiden Jahrzehnten schon wegen der breiten Anwendungen des Mobilfunks dieser Fragestellung angenommen und versucht, eventuelle Wirkungen elektromagnetischer Felder des Mobilfunks auf die Gesundheit zu finden.

Ein häufig geforderter Nachweis, dass elektromagnetische Felder, wie sie im Alltag vorkommen, keine gesundheitsrelevante Wirkung ausüben, ist dagegen grundsätzlich nicht möglich. Inzwischen liegen zur Problematik der elektromagnetischen Umweltverträglichkeit mehrere tausend Publikationen vor, in jedem Jahr kommen etwa 500 neue Aufsätze hinzu.

Das Ziel dieser Abhandlung ist es, einen Abriss des momentanen Wissensstandes und der laufenden Diskussionen zwischen den Experten zur Problematik der mutmaßlich gesundheitsschädigenden Wirkung der Mobilfunkfelder zu geben.

In Überarbeitung und Ergänzung der Literaturstudie "Auswirkung hochfrequenter Felder auf den Menschen" aus dem Jahr 2001 werden Publikationen aus peer-reviewed Journals und vollständig dokumentierte Arbeitsberichte aus den Jahren 2002 und 2003 zusätzlich berücksichtigt und zusammen mit älteren Publikationen bewertet.

Diese Studie kann selbstverständlich, schon wegen der großen Anzahl an Publikationen, keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Vielmehr wird Gruppen von Publikationen zu bestimmten wichtigen Themen vor einzelnen noch nicht überprüften Berichten der Vorzug gegeben. Damit wird der Fokus zwangsläufig auf Themen gelenkt, die zwischen Experten wie auch in der Öffentlichkeit intensiv und häufig auch widersprüchlich diskutiert werden. Die Ergebnisse zu einzelnen Themen werden am Ende der entsprechenden Abschnitte diskutiert und zusammengefasst.

Nach der Festlegung des Vorgehens in Abschnitt 3 folgt in Abschnitt 4 die Abhandlung der hochfrequenten Felder. Hier werden zur Vervollständigung der Inhalte die wichtigsten physikalischen Charakteristika der heutigen Mobilfunkfelder und Felder anderer drahtloser Technologien zusammengetragen. In einem weiteren Unterabschnitt folgt die Abhandlung der geltenden

Schutzverordnungen in Deutschland, in den Nachbarländern und in der EU. Im dritten Teil des Abschnittes wird der großen Anstrengung verschiedener Bundesländer, die Felder des Mobilfunks in der Praxis messtechnisch zu erfassen, Rechnung getragen. So wird der Leser über alltagstypische Feldstärken des Mobilfunks informiert, die mit den Werten der geltenden Schutzverordnungen verglichen werden können. Schließlich erfolgt die Erläuterung der wissenschaftlichen Ansätze zur Ermittlung der Feldimmission durch die unterschiedlichen Quellen hochfrequenter Felder.

Die Abschnitte 5 bis 10 stellen die Ergebnisse publizierter medizinisch/biologischer Studien gruppenweise vor. Die sich aus der bisher erschienenen wissenschaftlichen Literatur ergebenden Schlussfolgerungen zu den diskutierten Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf die Gesundheit des Menschen sind im Kapitel 1 zusammengefasst.

3. Auswahl der Literatur und Strukturierung der Literaturstudie

Zur Bewertung des aktuellen Wissenstandes über die Wirkung hochfrequenter Felder, insbesondere über die neuen Technologien, werden nur Literaturquellen mit vollständigen Angaben der angewandten Methode, des Materials und der Gewinnung der Ergebnisse herangezogen. Diese Voraussetzungen sind meist nur in Publikationen aus peer-reviewed Journalen und in vollständigen Untersuchungsberichten erfüllt. Durch die Beschränkung auf die Literatur mit einem Fokus auf hochfrequente Felder im Frequenzbereich zwischen 500 MHz und 5000 MHz und das Erscheinen in peer-reviewed Journalen verringert sich der Umfang der zu bewertenden Literatur bereits erheblich.

Eine weitere notwendige Reduktion des Umfangs zur Bewertung der herangezogenen Literaturmenge wird mit der Auswahl der Publikationen aus den letzten 10 Jahren erreicht. Diese Auswahl ist mit der Annahme berechtigt, dass bei jüngeren Arbeiten zur gleichen Problematik in den meisten Fällen eine bessere Versuchsplanung und Durchführung z.B. bezüglich des Materials, der Methode und bei epidemiologischen Untersuchungen bezüglich der Größe der untersuchten Gruppen vorgenommen wird und damit auch verlässlichere Ergebnisse gewonnen werden.

Aus diesem Grund werden die in den 70er und 80er Jahren publizierten strittigen Effekte nicht berücksichtigt, wenn sie in den letzten 15 Jahren keine Bestätigung erfahren haben. Zu derartigen unbestätigten Meldungen gehören z.B. die Existenz von Window-Effekten oder der Einfluss auf den Kalziumhaushalt der Zellen durch hochfrequente elektromagnetische Felder.

Die verbliebenen Publikationen werden in einem weiteren Schritt in Gruppen, die bezüglich der Art und des Endpunktes der Untersuchung vergleichbar sind, eingeteilt. Eine große Gruppe

von Publikationen setzt sich mit der Emission und Immission durch hochfrequente Felder des Alltags sowie mit Schutzverordnungen auseinander. Die absolute Mehrheit der Literaturquellen stellt die Ergebnisse medizinisch/biologischer Studien vor.

Insbesondere viele publizierte in vitro-Untersuchungen beschäftigen sich ganz individuell mit sehr speziellen Aspekten einer möglichen Wirkung der hochfrequenten Felder auf den Organismus. Ohne eine Überprüfung dieser Ergebnisse durch andere Forschergruppen ist die Einschätzung ihrer Relevanz und Übertragbarkeit auf den menschlichen Organismus jedoch nicht möglich; sie werden daher zunächst nicht zur Bewertung herangezogen.

Bei der Abhandlung einzelner Themen wird der Art der Untersuchung und damit auch der Wertigkeit der Befunde Rechnung getragen. Die Untersuchungen werden in nachstehender Reihenfolge präsentiert und bewertet:

- epidemiologische Studien
- Provokationsstudien
- tierexperimentelle Arbeiten und
- Untersuchungen im Reagenzglas (in vitro-Untersuchungen).

Die am meisten diskutierten Endpunkte (Effekte, gesundheitliche Beschwerden und Erkrankungen) im Zusammenhang mit der Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Alltag sind:

- das Krebsgeschehen
- subjektiv erfahrene Beschwerden (z.B. Kopfschmerzen, Migräne, Müdigkeit, Schlaflosigkeit etc.)
- Wahrnehmung
- Schlafstörung, und die
- Störung elektronischer Implantate.

Die Bewertung dieser Gruppen von Literatur soll folgende Fragen beantworten:

- Welche Charakteristika der hochfrequenten Felder sind relevant für die Einwirkung auf den Menschen?
- Wie stark sind hochfrequente Felder der neuen Technologien im Alltag?
- Welche Ergebnisse liefern statistische Erhebungen der Häufigkeit von Erkrankungen (epidemiologische Studien) in den Teilen der Bevölkerung, die bestimmten Feldern ausgesetzt ist, im Verhältnis zu nicht exponierten Kontrollen?
- Welche Resultate liefern experimentelle Studien zu verschiedenen Aspekten des Krebsgeschehens in hochfrequenten Feldern?
- Welche Belege gibt es für Effekte hochfrequenter Felder auf neuronale und neuromuskuläre Strukturen?
- Können hochfrequente Felder des Alltags elektronische Implantate beeinflussen und welche Studien sind dazu erforderlich?

4. Hochfrequente Felder im Alltag

Experimentelle Untersuchungen werden vorwiegend mit Feldern durchgeführt, die wesentlich stärker sind als Feldstärken im Alltag. Bisherige Untersuchungen berechtigen zu der Annahme, dass sich eventuelle Effekte mit größerer Wahrscheinlichkeit in stärkeren Feldern zeigen.

Bei der Übertragung der Ergebnisse experimenteller Studien auf den Menschen und auf die jeweilige Situation in der Praxis müssen die Unterschiede in der Exposition beachtet werden. Da zu den Feldexpositionen im Experiment wie auch im Alltag sehr unterschiedliche Angaben gemacht werden, ist der Vergleich nicht nur für Laien, sondern auch für Experten schwierig. Je mehr Emissions- und Immissionsdaten für die verglichenen Situationen zur Verfügung stehen, desto besser können die Felder im Experiment und in der Praxis verglichen werden. Wichtige und meist einfach definierbare Kennwerte der Felder wie die Frequenz, die Stärke und der zeitliche Verlauf oder die Modulation müssen grundsätzlich in etwa übereinstimmen, damit ein Vergleich zwischen einem Experiment und der Praxis möglich ist.

4.1 Relevante Charakteristika

Technische hochfrequente elektromagnetische Felder im Alltag weisen sehr unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf die verwendete Frequenz, Stärke, Modulation oder Sendart auf. Ihre vollständige Charakterisierung in Raum und Zeit ist sehr umfangreich und komplex, weshalb je nach Fragestellung nur die notwendigen Kennwerte aufgeführt werden.

Im Zusammenhang mit der Abhandlung möglicher Wirkungen hochfrequenter Felder auf die Gesundheit ist es erforderlich, die wichtigsten Feldcharakteristika aufzustellen. Ausgegangen wird dabei von nachgewiesenen wie hypothetischen Wirkungsmechanismen, die in der Literatur aufgeführt sind.

Grundsätzlich muss zwischen Emissions- und Immissionscharakteristika unterschieden werden. Die Emissionsdaten charakterisieren die Ausbreitung hochfrequenter Felder von der Sendeantenne, wogegen die Immission Felder beschreibt, denen eine Person in bestimmter räumlicher Zuordnung zur Sendeantenne tatsächlich ausgesetzt wird. Einige Charakteristika wie z.B. Frequenz und Modulation der gesendeten Welle sind für die Emission wie auch Immission hochfrequenter Felder gemeinsame Merkmale. Der Begriff Modulation schließt eine große Vielfalt möglicher Kodierungen der zu übertragenden Information ein, ihre genaue technische Beschreibung würde den hier vorgegebenen Rahmen bei weitem sprengen. Darüber hinaus lässt das heutige physikalische Verständnis auch bei Beachtung gewagter Hypothesen nicht erkennen, wie einige spezielle Modulationsarten der Mikrowellen unterschiedliche Wirkungen im Organismus ausüben können. Um der möglichen Beeinflussung elektronischer Implantate und der aktuellen Diskussion über eine besondere Wirkung niederfrequent pulsmodulierter Mikrowellen Rechnung zu tragen, werden als weitere Charakteristika der Felder die so genannte Pulshaltigkeit der niederfrequenten Umhüllenden und ihre spektralen Anteile definiert. Die Pulshaltigkeit ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen dem Leistungsanteil des ideal gleichgerichteten Sendesignals im Frequenzbereich zwischen 1 Hz und 1 kHz und der Gesamtleistung des Sendesignals. Von den spektralen Anteilen der niederfrequenten Umhüllenden sind nur die dominanten Frequenzen von Interesse.

Die Emissionsdaten wie z.B. Sendeleistung, Antennengewinn oder Sendediagramm sind zwar wichtige technische Parameter der Sendequelle, sie lassen allerdings nicht erkennen, wie stark und wie lange der Mensch an dem jeweiligen Aufenthaltsort exponiert wird.

Die Emission einer Feldquelle wird häufig grob mit der Sendeleistung und dem Antennengewinn beschrieben, eine bessere Charakterisierung liefern:

- die elektrischen Feldstärken E , Einheit Volt pro Meter (V/m)
- die magnetischen Feldstärken H , Einheit Ampère pro Meter (A/m)
- die Leistungsdichten P , Einheit Watt pro Quadratmeter (W/m^2).

Alle drei Größen E , H und P können als Funktion des Raumes definiert werden, wobei messtechnisch meist nur Stichproben der räumlichen Verteilung erhoben werden. Die die Stärke des Feldes beschreibenden Kennwerte können an einem Ort frequenzselektiv den Beitrag einer Quelle oder die Summe aller Quellen am Messort beschreiben.

Für eine genaue Charakterisierung der Immission wäre die orts- und zeitabhängige Angabe der Größen E , H und P in verschiedenen Geweben des Körpers zwar erforderlich, die dabei entstehende große Datenmenge würde jedoch sehr unhandlich. Darüber hinaus lassen sich diese Kennwerte nicht messtechnisch erfassen, sondern sie müssen in numerischen Simulationen oder physikalischen Modellen abgeschätzt werden.

Ausgehend von der anerkannten Wärmewirkung hochfrequenter Felder im Körper hat es sich eingebürgert, die Immission hochfrequenter Felder mit der so genannten Spezifischen Absorptionsrate (SAR) pro Gewichtseinheit in Watt pro Kilogramm oder Gramm (W/kg , W/g) in Bezug auf ein Gewebegewicht zwischen 1 g und 1 kg anzugeben. Sehr häufig werden nur die im jeweiligen Feld in einem bestimmten Körperteil auftretenden Maximalwerte angegeben.

Eine weitere schwer einzuschätzende Größe ist die Expositionsdauer, die bei epidemiologischen Studien zur Beurteilung eines eventuellen Langzeiteinflusses der Felder herangezogen werden müsste.

4.2 Quellen

In der älteren Literatur werden die Rundfunksender (Lang-, Mittel- und Kurzwellen und UKW), die Fernsehsender sowie die später dazu gekommenen Mobilfunkanlagen in C-, D- und E-Netzen als Quellen hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Alltag ausgewiesen. Dabei wird den Rundfunk- und Fernsehsendern der größte Beitrag von ca. 90 % und den Mobilfunkanlagen ein mittlerer Beitrag von ca. 10 % zugeordnet. Die heutigen Rundfunk- und Fernsehsender versorgen mit hohen Leistungen bis zu einigen Megawatt einen weiten Umkreis bis zu 100 km. Demnach herrschen in der Nähe der Sender starke Felder, mit dem Abstand nehmen die Feldstärken etwa direkt proportional und die Leistungsdichten mit dem Quadrat des Abstandes ab. Mit der Einführung des Mobilfunks hat eine neue Entwicklung eingesetzt. Mit kleinen Sendeleistungen mit bis zu 30 Watt der Basisstationen werden je nach Bebauung kleinere Bereiche im Umkreis zwischen 100 m und einigen 10 km versorgt, jedes Handy mit einer Sendeleistung bis zu 2 Watt exponiert den Nutzer aus unmittelbarer Nähe. Ein weiteres Merkmal der neuen Kommunikationstechnik ist, dass bevorzugt digitale Modulationen eingesetzt werden.

Die Verbreitung des Mobilfunks nahm im letzten Jahrzehnt rasant zu: die Anzahl der Mobilfunkteilnehmer in Deutschland hat sich von etwa 1,77 Millionen Teilnehmern Ende 1993 auf etwa 63 Millionen Ende 2003 mehr als verdreißigfacht. Die Zeiten der großen Zuwächse sind jedoch vorbei, in der Zukunft kann nur mit einem geringen Anstieg der Mobilfunknutzer oder mit einer Verlagerung zu UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) gerechnet werden. Die UMTS-Technik verwendet verschiedene digitale CDMA (Code Division Multiple Access-) Verfahren, wohingegen die herkömmlichen Mobilfunknetze (D- und E-Netz) mit einer digitalen Technik nach dem so genannten GSM-Standard (Global System for Mobile Communications) arbeiten. Der GSM-Standard wird weltweit in insgesamt 155 Ländern verwendet. Von den weltweit rund etwa 650 Millionen Mobilfunk-

Kunden, von denen allein 350 Millionen in Europa leben, wird der GSM-Standard genutzt. Weitere 270 Millionen Kunden nutzen Mobilfunknetze, die nach anderen digitalen Techniken arbeiten. Hinzu kommen nochmals rund 45 Millionen Nutzer analog arbeitender Mobilfunknetze (Stand: Dezember 2002). Die qualitativ minderwertigen C-Netze wurden in Deutschland gänzlich vom Markt verdrängt.

Weitere im Ausland gebräuchliche Mobilfunksysteme sind:

- **COFDM** (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) → analog
- **DAMPS** (Digital Advanced Mobile Phone System) → digital
- **DQPSK** (Differential Quadrature Phase Shift Keying) → analog
- **FDMA** (Frequency Division Multiple Access) → analog
- **NMT** (Nordic Mobile Telephone) → analog

In Deutschland gibt es derzeit vier digitale Mobilfunknetze, und zwar das D1-, D2-, E- und das UMTS-Netz. Um die ortsunabhängige Erreichbarkeit der Handys zu ermöglichen, ist ein gut ausgebautes und flächendeckendes Netz von Mobilfunkbasisstationen erforderlich. In den Gebieten mit einer höheren Nachfrage nach Funkverbindungen – z. B. in Städten – müssen die Basisstationen dichter aufgestellt werden, da die beschränkte Anzahl von verfügbaren Frequenzkanälen kleinräumigere Funkzellen erfordert. Besonders engmaschige Netze sind vor allem an Kommunikationsbrennpunkten wie Bahnhöfen, Messen und Verwaltungszentren notwendig. In Deutschland gibt es derzeit etwa 50.000 Standorte von Mobilfunkbasisstationen. Mehr als ein Drittel dieser Standorte wird für mindestens zwei Mobilfunknetze gemeinsam genutzt.

Mit der Einführung von UMTS-Netzen ist in den nächsten Jahren mit einem Aufbau zusätzlicher Mobilfunksender zu rechnen. Die Anzahl der Standorte von Mobilfunkbasisstationen wird sich deshalb in den nächsten fünf bis zehn Jahren verdoppeln.

Im Schatten des Mobilfunks erfolgte eine Umstellung der herkömmlichen drahtgebundenen Telefone auf drahtlose, vor allem digitale Technik. Dabei kommuniziert das tragbare, bei Benutzung am Kopf gehaltene Mobilteil mit einer Ladestation im Haus mittels digital modulierter Mikrowellen nach einem dem Mobilfunk ähnlichen **DECT** (Digital Enhanced Cordless Telephone)-Standard.

Eine ähnlich rapide Entwicklung wie beim Mobilfunk ist bei der Realisation von drahtlosen Verbindungen zwischen Computerelementen und der drahtlosen Anbindung der Computer an Netzwerke zu erwarten. Die ersten Repräsentanten dieser digital sendenden Technologie sind z. B. **WLAN** (Wireless Local Area Network) oder Bluetooth. Obwohl diese mit einer relativ niedrigen Sendeleistung betrieben werden (siehe Abschnitt 4.7), können sie wie das Schnurlostelefon aufgrund der geringen Entfernung zum Körper nennenswerte Immissionen verursachen.

Darüber hinaus werden in Zukunft zahlreiche hoheitliche Funkdienste (Polizei, Bundeswehr, Radar im Luftverkehr etc.) oder der Amateurfunk neu eingeführt, die digital modulierte hochfrequente elektromagnetische Felder mit unterschiedlichen Charakteristika verwenden werden.

In der Praxis werden hochfrequente Felder an und in Gebäuden sowie durch Bäume und die Erdoberfläche auf vielfältige Weise absorbiert und reflektiert. Insbesondere in und zwischen den Häusern entstehen deshalb komplexe Feldverläufe, die nur messtechnisch erfasst werden können. Eine Reihe von durchgeführten Messungen in Gebäuden und Wohnungen sowie in Arealen in der Nähe von Sendern (in Bereichen, die für den Menschen frei zugänglich sind) vermittelt den besten Einblick in die tatsächliche Feldsituation. Bei der Betrachtung der Exposition der Bevölkerung durch die hochfrequenten Felder spielen die örtliche Feldstärke der elektrischen und magnetischen Komponente in und an Gebäuden, bzw. die Leistungsflussdichte, eine entscheidende Rolle. Grundsätzlich nimmt die Stärke aller Felder mit der Entfernung von der Sendeantenne ab.

Im Weiteren werden als Hauptquellen von Mikrowellen im Alltag die herkömmlichen Fernsehsender, die Mobilfunksysteme, bestehend aus Basisstationen und Mobiltelefonen, sowie Schnurlostelefone, WLAN und Bluetooth betrachtet.

4.3 Wirkungsmechanismen hochfrequenter Felder

Die Energie der in das Gewebe eindringenden elektromagnetischen Felder wird bekanntlich in Wärme umgewandelt. Die Erwärmung des jeweiligen Gewebes ist einerseits direkt proportional zur aufgenommenen Energie und damit zur spezifischen Absorptionsrate (SAR in W/kg, meistens angegeben pro 1 g oder 10 g der Körpermasse). Andererseits spielen unterschiedliche physikalische und physiologische Wärmeableitmechanismen im Körper eine wichtige Rolle.

Die dem Körper durch elektromagnetische Felder zugeführte Wärme wird mit der metabolischen Körperwärme verglichen. Der typische Wärmeumsatz eines Erwachsenenkörpers beträgt etwa 4 W/kg im Ruhezustand, bei körperlicher Arbeit steigt dieser Wert auf ein Vielfaches. Deshalb wird davon ausgegangen, dass eine durch hochfrequente Felder zugeführte Wärmeenergie unter 4 W/kg keine gesundheitsrelevante Wirkung ausübt.

Körperliche Arbeit kann die physiologische Körpertemperatur von normalerweise um 36 °C auf mehr als 39 °C ansteigen lassen. Ein derartiger Anstieg der Körpertemperatur im Ruhezustand ist ein sicheres Anzeichen für Fieber. Mit einer Schädigung des Gewebes durch übermäßige Erwärmung (Hyperthermie) muss ab einer Körpertemperatur über 41 °C gerechnet werden.

Alle biologischen Prozesse sind stark temperaturabhängig, weshalb auch kleinere Erwärmungen einen Einfluss auf die Körperfunktionen ausüben. Solange sie aber im physiologischen Variationsbereich bleiben, sind die Effekte ohne gesundheitliche Relevanz.

Alle bisher belegten Effekte in hochfrequenten Feldern konnten primär nur auf thermische Effekte zurückgeführt werden.

Die Existenz so genannter athermischer Effekten unter Einwirkung hochfrequenter Felder unterhalb der Grenzwerte ist dagegen stark umstritten. Unterschiedliche physikalisch abgeleitete Theorien zur Existenz von so genannten Resonanz- und Window-Effekten im Organismus unter Einwirkung hochfrequenter Felder wurden präsentiert, ohne dass auch nur ansatzweise eine experimentelle Bestätigung herbeigeführt werden konnte.

Im Zusammenhang mit dem Mobilfunk wird häufig eine besondere Wirksamkeit der pulsmodulierten Anteile, also der niederfrequenten Umhüllenden des hochfrequenten Feldes im menschlichen Organismus diskutiert. Da die hochfrequenten Felder primär nur ein hochfrequentes Spektrum aufweisen, bedarf es eines nichtlinearen Verhaltens im Gewebe bzw. in der Zellmembran, um die niederfrequenten Anteile einwirken zu lassen. Die Zellmembran verfügt zwar über bestimmte Gleichrichterfähigkeiten für niederfrequente Ströme bis zu Frequenzen von einigen MHz, im Mikrowellenbereich konnte dieses Verhalten aber bisher nicht belegt werden.

Ein nichtlineares Verhalten in hochfrequenten Feldern zeigt dagegen die Elektronik verschiedener Implantate, wie sie z.B. in Herzschrittmachern oder Insulinpumpen verwendet wird. Ein Teil der im Alltag auftretenden Störungen dieser Implantate ist auf die niederfrequente Umhüllende eines starken hochfrequenten Signals, z.B. von Handys, zurückzuführen.

4.4 Empfehlungen und Verordnungen

Die EU-Ratsempfehlung

Die EU-Ratsempfehlung zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern bis zu einer Frequenz von 300 GHz (1999/519/EG) schreibt für die Mitgliedsländer die maximal zulässigen Feld-

stärken für einzelne Frequenzen elektromagnetischer Felder vor. Die Werte der Empfehlung, die von den einzelnen Mitgliedsstaaten unterschritten werden können, gehen von den belegten thermischen Wirkungen der Mikrowellen im Körper aus. Dabei werden durch die Einführung von Vorsorgefaktoren nur physiologisch vernachlässigbare Erwärmungen des Körpers durch die Mikrowellen von weniger als $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ akzeptiert.

Deutschland

Zum Schutz der Bevölkerung sind die Immissionen durch hochfrequente Felder oberhalb von 10 MHz gesetzlich beschränkt. Es gelten die Grenzwerte des Anhangs 1 zur Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV). Diese sind konform mit der EU-Ratsempfehlung zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern. Für den Frequenzbereich von 10 bis 400 MHz, in dem der Kurzwellen- und UKW-Rundfunk sowie zum Teil das Fernsehen im VHF-Band senden, sind die zulässigen über 6 Minuten-Intervalle quadratisch gemittelten Effektivwerte der elektrischen Feldstärken E auf $27,5\text{ V/m}$ und der magnetischen Feldstärken H auf $0,073\text{ A/m}$ beschränkt. Die korrespondierende Leistungsdichte S beträgt 2 W/m^2 .

Im Frequenzbereich von $f = 400$ bis 2000 MHz sind die Grenzwerte frequenzabhängig mit $1,375\sqrt{f}$ (Wurzel der Frequenz) V/m für die elektrischen und $0,0037\sqrt{f}\text{ V/m}$ für die magnetischen Feldstärken gegeben. Auch hier werden quadratisch über 6 Minuten gemittelte Effektivwerte herangezogen.

Hieraus resultieren für die UHF-Fernsehsender im Frequenzbereich zwischen 470 und 790 MHz die höchsten Werte für die Frequenz von 790 MHz und zwar $E = 38,65\text{ V/m}$ und $H = 0,1\text{ A/m}$ bzw. $S = 4\text{ W/m}^2$.

Bei Mobilfunkfeldern im D-Netz mit Sendefrequenzen der Basisstationen zwischen 935 MHz und 960 MHz liegen die Grenzwerte für die elektrische Feldstärke bei etwa 42 V/m bzw. für

die Leistungsdichte bei $4,69\text{ W/m}^2$. Die Grenzwerte für den Mobilfunk im E- und UMTS-Netz im Frequenzbereich um 1900 MHz betragen für die elektrische Feldstärke ca. 60 V/m bzw. 9 W/m^2 .

Die Festlegung des Sicherheitsabstandes zu den für Menschen zugänglichen Bereichen, in denen die Feldstärken der gesendeten Felder auf die vorgegebenen Grenzwerte abgeklungen sind, erfolgt in Deutschland durch die Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP), meist aufgrund einer theoretischen "worst-case"-Berechnung. Betrachtet werden die maximalen Feldstärken und Leistungsdichten, die sich bei einer ungestörten Ausbreitung des Feldes in der Hauptstrahlrichtung der Antenne ergeben. Wie praktische Messungen zeigen, ist dieses Verfahren sehr gut zu handhaben, es wird jedoch als konservativ angesehen. Die im Alltag tatsächlich auftretenden Felder sind wesentlich schwächer als die vorgeschriebenen Werte (siehe Abschnitt 4.5).

Schweiz

In der Schweiz werden zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern rechtsverbindliche Anlagengrenzwerte eingeführt. Demnach dürfen die Feldstärken an "Orten mit empfindlicher Nutzung", also in Räumen, in denen sich Personen regelmäßig für längere Zeit aufhalten, bestimmte niedrigere als die durch die 26. BImSchV in Deutschland festgesetzten Werte nicht überschreiten. Dabei handelt es sich vor allem um Wohnräume, Schulen, Kindergärten, Krankenhäuser, Altersheime und ständig besetzte Arbeitsplätze. Kirchen, Theater- oder Konzertsäle gehören dagegen nicht zu dieser Kategorie. Da die Werte am Aufenthaltsort von Personen festgelegt sind, müssten sie streng genommen bei jeder Baumaßnahme in der Umgebung von Sendeanlagen oder sogar im Gebäude oder am Aufenthaltsort selbst neu überprüft werden.

Die Anlagengrenzwerte für Orte mit empfindlicher Nutzung sind in der Schweiz wie folgt festgelegt:

- Mobilfunk D-Netz (GSM 900): 4 V/m
- Mobilfunk E-Netz (GSM 1800) oder UMTS: 6 V/m
- GSM 1800 / UMTS und GSM 900: 5 V/m.

Messungen an verschiedenen Orten (siehe Abschnitt 4.5) zeigen, dass diese Werte auch in Deutschland in den meisten Fällen unterschritten werden.

Im Weiteren werden alle Messwerte auf die 26. BImSchV bezogen und in Prozent des Grenzwertes (GW) der elektrischen Feldstärke ausgedrückt.

4.5 Messungen der Feldstärken im Alltag

Die räumliche Verteilung der Feldstärken bzw. Leistungsdichten der gesendeten elektromagnetischen Mikrowellen ist insbesondere in unmittelbarer Nähe der Sendeantenne sowie in urbanen Gebieten sehr kompliziert. Der Grund dafür sind vor allem die zahlreichen Reflexionen der Wellen an Gebäuden, die die Feldstärken im Raum anheben und absenken. Deshalb lassen sich die typischen Emissionswerte in verschiedenen Lebensbereichen nur statistisch aus vielen Messungen abschätzen. Zu diesem Zweck wurden in den letzten Jahren in einigen Bundesländern zum Teil großräumige Messungen der hochfrequenten Emission durchgeführt.

Bochtler et al. (2003) berichten über die Ergebnisse eines Funkwellen-Messprojektes, das in den Jahren 2001 bis 2003 in Baden-Württemberg durchgeführt wurde. Insgesamt wurden in Gemeinden in Oberschwaben, in Städten und außerhalb von Ortschaften Messungen an 895 Orten in regelmäßigen 2 Kilometer-Rastern vorgenommen.

In 80 % der Messorte sind die Felder der klassischen Funkdienste (Rundfunk und Fernsehen) stärker, in 20 % schwächer als die Felder des Mobilfunks. Der durchschnittliche Anteil des Mo-

bilfunks an der Gesamtimmission durch hochfrequente elektromagnetische Felder beträgt 20 %. Maximale Feldstärken zwischen 2 % und 10 % des Grenzwertes treten vereinzelt nur in unmittelbarer Sendernähe, wobei der Mobilfunk im Durchschnitt nur 0,34 % des Grenzwertes ausschöpft.

Matzke et al. (2003) messen elektromagnetische Felder von Radio- und Fernsehsendern sowie Mobilfunkbasisstationen an neun unterschiedlichen, vom Umweltamt der Stadt Schwerin ausgewählten Regionen in der Nähe von Mobilfunkanlagen. Der Messbereich pro Region ist auf einen Kreis von 15 m Durchmesser und eine Höhe zwischen 0,75 m und 1,75 m beschränkt, die Messung erfolgt jeweils in drei orthogonalen Richtungen. Die höchsten festgestellten Messwerte für ein Mobilfunknetz liegen bei 0,625 V/m bzw. 1,04 mW/m². Die Gesamtfeldstärke bzw. Leistungsdichte für alle Mobilfunknetze an diesem Ort stellt mit 1,53 V/m bzw. 6,2 mW/m² ebenfalls einen Maximalwert dar. Damit wird der geltende Grenzwert der 26. BImSchV zu maximal 3,6 % ausgeschöpft.

Wuschek (2003) stellt Messungen an 21 Orten im Umkreis von 10 Standorten von Mobilfunkantennen in D-, E- und UMTS-Netzen in der Stadt Nürnberg vor. Es werden Messorte ausgewählt, die folgenden Kriterien genügen:

- "sensible" Einrichtungen in der Nähe der Basisstationen
- mehrfache Nutzung der Sendemasten
- Nähe von Basisstationen zu Wohngebieten
- Standorte mit geringem Höhenunterschied zu Wohnbereichen
- Standorte mit UMTS.

Die Entfernung zwischen dem Standort und dem Messpunkt variiert zwischen 5 m und 300 m. Nur an drei Messstellen ergeben sich relativ hohe elektrische Feldstärken zwischen 4 V/m und 10 V/m, die maximal eine 7- bis 16%-ige Ausschöpfung des Grenzwertes darstellen. Als Mittel ergibt sich für alle Messorte eine Summenfeldstärke von 2 V/m, die eine etwa 4%-ige Ausschöpfung des Grenzwertes liefert. Für die "sensiblen" Bereiche wie z. B. Schulen liegt der Mittelwert bei 1,6 V/m (3,2 % des Grenzwertes).

Im Weiteren wurden die elektrischen Feldstärken eines D-Netz-Handys bei voller Leistung im Freien und in einem Linienbus für verschiedene Abstände zwischen 0,6 m und 7,3 m verglichen. Für kleine Abstände von 0,6 m verursachten die Reflexionen im Bus nur einen kleinen Anstieg der elektrischen Feldstärke von 5 V/m (12 % des GW) im Freien auf 7 V/m (17 % des GW) im Bus. In größeren Abständen nimmt die Feldstärke annähernd linear mit dem Abstand bis zu 0,4 V/m bei 7,3 m Abstand vom Handy ab, wobei im Bus ungefähr zweimal so hohe Werte gemessen wurden.

Nießen et al. (2002) führen Messungen der Leistungsflussdichte im Gebäude der Universität Bremen durch. Zielsetzung ist es, die Emissionen der eingerichteten WLAN-Netzwerke mit DECT-Schnurlostelefonen, D- und E-Netz-Mobilfunk sowie Mikrowellenherden zu vergleichen. Die WLAN-Messung ergibt maximale Werte von 2,5 mW/m² bzw. 0,97 V/m direkt am Access Point und 0,158 W/m² bzw. 7,22 V/m in einer Entfernung von 20 cm von einer im Notebook eingesteckten WLAN-Netzwerkkarte. Mit zunehmendem Abstand nimmt die Leistungsflussdichte schnell ab.

Vergleichbare Werte werden auch bei DECT-Telefonen ermittelt, die im Abstand von 40 cm etwa 0,171 W/m² bzw. 8 V/m liefern. Der in drei unterschiedlichen Räumen vorgenommene Vergleich zwischen UKW, UHF, D- und E-Netz-Mobilfunk sowie WLAN ergibt, dass die WLAN-Werte nur an einigen wenigen Messstellen stärker ausfallen als die Werte der Felder der restlichen Quellen ausfällt. Der Beitrag des Mikrowellenherdes macht sich gegenüber den restlichen gesendeten Feldern nur bei alten Geräten und nur bei einem Abstand unter 1 m bemerkbar. Bei einem Abstand von 50 cm ergibt sich bei einem alten Mikrowellenherd eine Leistungsdichte von 0,156 W/m² bzw. 7,7 V/m, wohingegen bei einem neuen Gerät nur 0,0078 W/m² bzw. 1,7 V/m gemessen wurden.

Wuschek (2000) bietet mit seinem Bericht einen guten Einblick in die Expositionssituation in Deutschland. Die Daten basieren auf exemplarischen Messungen an repräsentativen Orten in

Schleswig-Holstein. In die Betrachtung werden Mittelwellenrundfunk- (Lang-, Mittel- und Kurzwellen), UKW- und TV-Sender sowie die Basisstationen des Mobilfunks in D- und E-Netzen und Radarsender einbezogen.

Insgesamt werden 12 Messorte in Gebäuden (öffentliche Gebäude, Einfamilien- und Hochhäuser im städtischen wie auch ländlichen Bereich, Bauernhöfe) und auf freien Flächen (städtischer Großparkplatz, Felder, Gärten und Feldwege) ausgewählt. Die Messungen erfolgen in einer Höhe von 1,3 m. Da in der unmittelbaren Umgebung dieser Messorte oft unterschiedliche Sendeanlagen aufgebaut sind, muss bei den Ergebnissen häufig von einer "worst-case"-Situation ausgegangen werden. Die Immissionen für einzelne Sender wie auch für die Gesamtheit der Einrichtungen werden bezogen auf die Grenzwerte der 26. BImSchV der elektrischen Feldstärke und als relative Prozentwerte angegeben.

Die Ergebnisse zeigen, dass in Gebäuden die Bewohner in den oberen Etagen eines nahe gelegenen Hochhauses und im Dachgeschoss eines Einfamilienhauses die stärkste Immission durch die Sender der Basisstationen erfahren. Dabei betragen die elektrischen Feldstärken in Wohnungen der oberen Geschosse maximal 2,2 % des Grenzwertes. Dieser Wert fällt in Wohnungen unterer Geschosse mit einem Mittelwert von 0,45 % deutlich niedriger aus.

Die UKW-,TV- wie auch die Mittelwellensender erreichen übereinstimmend mit 4,94 % bzw. 6,32 % des Grenzwertes die maximalen Immissionen auf dem Balkon, aber auch innerhalb eines Hochhauses (7. Geschoss) und sind damit die stärksten Quellen hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Ort. Nur im Freien, auf einem Feldweg, wurden mit 15,75 % im Mittelfrequenzbereich höhere Werte gemessen. Die Immission durch die Radaranlagen liegt bei nur 0,01 % des gesetzlichen Grenzwertes und ist damit im Vergleich zu anderen Quellen vernachlässigbar.

Wuschek (1999) führte eine Messung in der Marktgemeinde Schopfloch, Landkreis Ansbach

(Mfr.) durch. In dieser Gemeinde werden mehrere Mobilfunkanlagen (C-Netz mit 45,1 W und D-Netz mit 13,5 W) und UKW- Rundfunksender (303 W) betrieben. Insgesamt wurden 31 Messungen in 20 Wohnungen sowie 2 Messungen im Freien durchgeführt.

In den Wohnungen betragen die höchsten Feldstärken des UKW-Senders 2,4 % des Grenzwertes, 0,21 % des Grenzwertes für die C-Netz-Basisstation und 0,1 % des Grenzwertes der Basisstation im D1- Netz. Die Durchschnittswerte für alle Wohnungen liegen für UKW-Sender bei 0,75 %, für C-Netz-Mobilfunksender bei 0,04 % und für D-1-Netz-Sender bei 0,03 % des Grenzwertes. Die Exposition durch die Felder von UKW-Sendern dominiert deutlich gegenüber dem Mobilfunk. Die durchschnittliche UKW-Leistungsflussdichte ist damit etwa 280-mal stärker als die durchschnittliche Leistungsdichte des C-Netzes und etwa 760-mal stärker als die durchschnittliche D-1-Netz-Exposition. Im Durchschnitt erzeugt der UKW-Sender in den Wohnungen 99,5 % der Gesamtexposition.

Die stärkste Exposition durch den Mobilfunk innerhalb einer Wohnung weist Leistungsdichten auf, die 560-mal (im C-Netz) und etwa 800-mal (im D-1-Netz) kleiner sind als die maximal gemessene Immission durch die UKW-Felder.

In Österreich, wo etwa vergleichbare Expositionsverhältnisse wie in Deutschland vorzufinden sind, führten mehrere Institute unabhängig voneinander eine messtechnische Ermittlung der elektromagnetischen Hochfrequenzfelder an verschiedenen Orten in der Stadt Wien und in verschiedenen österreichischen Gemeinden durch. Dabei werden vor allem die Frequenzen der UKW-Sender, der Fernsehsender sowie der Mobilfunkanlagen überprüft. Die Messungen wurden jeweils an vordefinierten Orten in Gebäuden, Schulen und Kindergärten durchgeführt. In einzelnen Gebäuden wurde dazu noch die Expositionsstärke am Arbeitsplatz bzw. direkt am Fenster separat frequenzselektiv oder breitbandig gemessen.

Eine schmalbandige Messung von **Neubauer und Neumann (1999 a, b)** in einer großstädti-

schen Umgebung liefert für Wohnbereiche maximale Werte der elektrischen Feldstärke von 0,0194 V/m für UKW-, 0,0133 V/m für TV-Sender und 0,57 V/m für die Felder der Basisstationen des Mobilfunks im D-Netz. Die breitbandige Messung im Frequenzbereich zwischen 0,5 MHz und 1500 MHz ergibt im Innern der Wohnungen einen maximalen Wert von 0,28 V/m, wobei am Fenster bis zu 1,4 V/m gemessen werden. Die über den gesamten Frequenzbereich von 0,5 MHz bis 1500 MHz summierten elektrischen Feldstärken betragen maximal 0,5 % des Grenzwertes. Detaillierte Messungen in ländlichen Gegenden ergeben maximale Feldstärken von 0,0025 V/m für UKW-Sender, für den Fernsehbereich von 0,0026 V/m und für die nahe Basisstationen im E-Netz von 0,0972 V/m (0,16 % des Grenzwertes). Die Felder der Mobilfunk-Basisstationen im D-Netz erreichen maximal 0,0052 V/m und damit nur 0,01 % des Grenzwertes.

Malek und Seier (1999) führen eine ausführliche Messung in einer Wohnung in der Nähe einer Basisstation im D-Netz durch. Es wurden getrennte Untersuchungen an verschiedenen Orten im Schlafzimmer und im Wohnzimmer durchgeführt. Die Messungen ergeben für das Wohnzimmer maximale Werte von 0,0024 V/m und 0,04 V/m für die Felder der Basisstationen im D-Netz. Im Schlafzimmer werden maximale Werte von 0,0016 V/m im Bereich der UKW-Sender, 0,0041 V/m im Bereich der Fernsehsender und 0,0316 V/m für die GSM-Anlagen im D-Netz maximal gemessen. Insgesamt betrachtet dominieren an diesen Messorten die Felder der Mobilfunkanlagen, wobei aber auch diese nur im Bereich von einem Tausendstel (0,1 %) des Grenzwertes liegen.

Pkw und Lkw werden immer häufiger mit einer Außenantenne für die Nutzung des Mobilfunks ausgestattet. Wegen der möglichen Nähe zum Fahrzeugführer und zu den Wageninsassen, sowie bei einem Halt des Wagens auch zu Passanten, stellt sich die Frage nach der Exposition dieser Personen durch die Mobilfunkfelder der Pkw-Anlagen im D-Netz. Die bordeigenen Mobilfunkeinrichtungen unterscheiden sich in den meisten Feldcharakteristika nicht von den Han-

dys. Nur die Einpassung der Außenantenne wird zugeschnitten gestaltet. Darüber hinaus können Automobilfunkanlagen im D-Netz mit einer Leistung von bis zu maximal 8 W betrieben werden.

Für die Ermittlung der Expositionsbedingungen für Personen, die sich in der Nähe eines stehenden Wagens mit einer Außenantenne befinden, sind die Regeln der Fernfelder anzuwenden. Bei einem Abstand von ca. 1 m von der Antenne kann die elektrische Feldstärke einen Wert von 10 V/m erreichen, mit weiterer Entfernung nimmt die Feldstärke linear proportional ab.

Die Feldverhältnisse innerhalb des Pkws werden durch die unterschiedlichen Konstruktionsmerkmale des Wagens bestimmt, sie lassen sich nicht pauschal angeben und müssen individuell für jeden Pkw und jede Situation ermittelt werden.

Eine exemplarische Messung mit einer bordeigenen D-Netz-Anlage in einem Pkw des Typs BMW 520 wurde von **Brose et al. (1994)** durchgeführt. Die Anlage speist eine Heck-Antenne mit 2 W. Die im Wagen gemessene Verteilung elektrischer Feldstärke bleibt im gesamten Fahrzeug ohne Insassen etwa gleich um 10 V/m.

4.6 Immission

Die hochfrequenten elektromagnetischen Felder verschiedener Quellen dringen in den menschlichen Körper ein und werden hier stärker als in der Luft absorbiert. Die Absorption der hochfrequenten Energie im Körper hängt maßgeblich von der Geometrie und Anatomie des Körpers, den elektrischen und dielektrischen Eigenschaften einzelner Körpergewebe, aber auch von der Frequenz und Polarisation der Wellen sowie der Feldart (Nah- und Fernfeld) ab. Ein Maß für die absorbierte Energie ist die so genannte Spezifische Absorptionsrate (SAR) mit der Einheit W/kg, die auf 1 mW/cm² bzw. 1 W/m² Leistungsdichte des einwirkenden Feldes oder Sendeleistung bezogen wird. Alternativ werden mittlere SAR-Werte des Körpers oder SAR-Werte pro 1 g oder 10 g Körpermasse angegeben.

Die folgerichtige Frage zielt auf das Eindringen der von den hochfrequenten Quellen ausgesendeten Felder in den menschlichen Körper. Im Gegensatz zu den bereits behandelten Feldcharakteristika, die zumindest im Einzelfall messtechnisch eindeutig bestimmt werden können, ist die Ermittlung der Kennwerte des in den Körper eingedrungenen Feldes problematisch, da eine Messung direkt im menschlichen Körper ethisch nicht vertretbar ist.

In der Literatur werden deshalb drei andere unterschiedliche Ansätze zur Abschätzung der Feldkennwerte im Körper präsentiert, und zwar über

- die Messung in einem physikalischen Trogmodell des Körpers,
- die numerische Berechnung, die auf einer Aufteilung des Körpers in eine hohe Anzahl (bis 107) Volumeneinheiten (Voxels) beruht und eine angepasste Form der Maxwell'schen Gleichungen anwendet, sowie
- die indirekte Ermittlung über die Erwärmung des Körpers durch Mikrowellen.

In direkter Konkurrenz zu den physikalischen Modellen stehen numerische Simulationen mit einer Auflösung unter 1 mm³. Im Bereich des Kopfes ist es dadurch möglich, die Anatomie des Gehirns und seine dielektrischen Eigenschaften sehr detailliert und weitestgehend anatomiegetreu nachzubilden. Die numerischen Modelle sind sehr flexibel bei einer eventuell notwendigen Korrektur der dielektrischen Eigenschaften einzelner Gewebearten und deren Geometrie sowie bei der Berechnung der SAR-Werte für verschiedene Volumina. Darüber hinaus erlauben sie eine Fortführung der Problematik über die Feldberechnung zur Betrachtung des Wärmehaushaltes, in dem aus den örtlichen Feldstärken bzw. Stromdichten die Erwärmung des Gewebes errechnet wird. Allerdings fehlen bisher experimentelle Überprüfungen der berechneten bzw. in physikalischen Modellen gemessenen Werte, die die Richtigkeit bzw. Unsicherheiten dieser Methoden aufzeigen.

Van de Kamer et al. (2002) führen eine numerische Berechnung der SAR-Verteilung im Kopf bei Nutzung eines Handys im D-Netz (915 MHz)

durch. Mit der Wahl unterschiedlicher räumlicher Auflösungen des Kopfes von 0,4 mm, 1mm und 2mm wird der Frage nachgegangen, ob punktuell (bei 1 g Körpermasse) eine höhere SAR als bei Bezug auf 10 g Körpermasse, erzielt werden kann. Für eine effektive Leistung von 0,25 W resultieren aus der Berechnung der maximalen gemittelten SAR-Werte zwischen 1,72 und 2,55 W/kg bei Bezug auf 1 g und 0,98 bis zu 1,73 W/kg bei 10 g.

Für die Berechnung der Mittelwerte reicht also auch eine Auflösung von 2 mm. Der Vergleich der SAR in einzelnen finiten Elementen ergibt dagegen große Unterschiede in Abhängigkeit von der Auflösung. Diese Unterschiede sind insbesondere an Übergängen von anatomischen Strukturen mit verschiedenartigen dielektrischen Eigenschaften stark ausgeprägt.

Numerische und experimentelle Modellierungsmethoden im physikalischen Modell werden bei **Gandhi et al. (1999)** verglichen. Die Autoren verwenden eine hochauflösende Finite Elemente Technik mit einer Auflösung von $2 \times 2 \times 3$ mm. 15 unterschiedliche Gewebearten des Kopfes und des Gehirns, und zwar Muskel/Fett/Knochen, Knorpel/Haut/Nerven/Blut, Ohr/Speicheldrüse/Auge mit Linse, Sklera und Auge, Körper, Gehirn sowie Pinealdrüse werden berücksichtigt. Als Quelle dienen 10 unterschiedliche 835 MHz-Handys. Die numerischen Ergebnisse werden mit einer experimentellen Messung im homogenen Trogmodell verglichen. Die Ergebnisse aus dem physikalischen Modell und der numerischen Berechnung zeigen eine sehr gute Übereinstimmung, wobei die Messungen im physikalischen homogenen Modell nur in wenigen Vergleichspunkten bis zu 20 % höhere Werte als die numerische Methode zeigen. Bei der numerischen wie auch bei der physikalischen Methode ergeben sich maximale SAR-Werte von 1.55 W/kg, gemittelt über 1 g Gewebe und bezogen auf 600 mW gesendete Leistung.

Wegweisend sind numerische Simulationen von **Van Leeuwen et al. (1999)**, bei denen neben der hochauflösenden Feldberechnung des Nahfeldes im Kopfbereich auch die Änderung der Gehirntemperatur berechnet wird. Unter Zuhilfe-

nahme der FDTD-Methode wird der Kopf in Volumina-Einheiten mit 2 mm^3 Auflösung aufgeteilt, wobei folgende 10 unterschiedliche Gewebearten (Haut, Fett, Knochen, Liquor, graue Masse, weiße Masse, Muskel, Sinus, Augenlinse, Augenkörper) berücksichtigt werden.

Bei der Berechnung des thermischen Modells kommt das Programmpaket "DIVA" zur Anwendung, bei dem die Wärmeversorgung des Kopfes über das Blut, die Wärmeverluste an die Umgebung, nicht aber die metabolische Wärmeproduktion berücksichtigt werden. Als Quelle der Mikrowellen dient ein herkömmliches GSM-Handy mit 2 W Maximalleistung und 0,25 W mittlerer Leistung. Die Ergebnisse zeigen den größten SAR-Wert von 4 W/kg in einem Element des Muskels. Die berechnete SAR im Kopf für 1 g Masse beträgt maximal 1,53 W/kg und, gemittelt über 10 g, nur 0,91 W/kg. Diese Werte liegen bis zu 20 % niedriger bei der Annahme einer dickeren Hautschicht. Die Handy-Exposition resultiert aus einer Erwärmung des Gehirns um $0,11 \text{ }^\circ\text{C}$. Diese minimale Erwärmung wird durch eine oberflächliche Temperaturveränderung an Probanden überprüft und bestätigt.

Wegen der Benutzung der Handys in unmittelbarer Körperrnähe haben die elektromagnetischen Felder einen Nahfeldcharakter, bei dem die elektrische und die magnetische Komponente ihre im Fernfeld vorhandene Orthogonalität verlieren und deshalb getrennt bestimmt werden müssen. Bei der Untersuchung der Exposition durch die Nahfelder ist die Aufmerksamkeit vor allem auf den Bereich des Kopfes gerichtet, wo die Handys zum Einsatz kommen.

Gandhi et al. (1999) modellieren einen menschlichen Körper in der Größe von 175 cm und mit einem Gewicht von 70 kg. Für die numerische Berechnung des Fernfeldes im Frequenzbereich zwischen 100 MHz und 915 MHz mit der FDTD-Methode wird eine räumliche Auflösung des Körpers mit Elementen von 13,1 bzw. 26,2 mm Kantenlänge erarbeitet. Insgesamt werden 14 unterschiedliche Gewebearten mit dielektrischen Eigenschaften berücksichtigt. Für eine vertikal polarisierte E-Welle werden aus der ermittelten Stromdichte die SAR-Werte in Körperschichten

pro Organ und summarisch für den ganzen Körper errechnet.

Die Ermittlung der in den Körper eindringenden Feldkomponenten des Nahfeldes, insbesondere bei der Benutzung von Mobiltelefonen, wird ebenfalls im physikalischen oder numerischen Modell vorgenommen, da eine direkte Messung im menschlichen Körper aus ethischen Gründen problematisch ist. Wegen der ungünstigen Feldverhältnisse (höhere Leistung und niedrigere Betriebsfrequenz) haben sich die meisten Untersuchungen mit den Handys im D-Netz auseinander gesetzt.

Ein eingeschaltetes Handy baut im Körper elektromagnetische Felder auf, deren Stärke und Verteilung nicht nur von den primären Feldkennwerten wie z. B. Frequenz, Feldstärke und Polarisation der Welle abhängen, sondern die auch in komplexer Weise von der geometrischen Anordnung zwischen Körper und Handy sowie den Konstruktionsmerkmalen des jeweiligen Handys abhängig sind.

Viele dieser Gesichtspunkte können vorteilhaft in Untersuchungen mit physikalischen Modellen berücksichtigt werden, in denen auf dem Markt befindliche Handys als Expositionsquelle Anwendung finden. Der Kopf wird dabei mit einem Schalenmodell und das Gehirn mit Hilfe einer Flüssigkeit nachgebildet, die äquivalente elektrische und dielektrische Eigenschaften, gemittelt über alle Gewebe im Gehirn, bei der jeweiligen Frequenz aufweisen. Wegen der niedrigen Eindringtiefe bei 900 MHz (ca. 3 cm) wird es für ausreichend gehalten, nur eine Hälfte des Kopfes nachzubilden, um in der Nachbildung der Gehirnhälfte im Modell elektrische Feldstärken einfacher messen zu können. Geeignete Miniatursonden sowie eine präzise Lokalisation der Mess-Sonde, z. B. mit Hilfe eines Roboters, sind die Voraussetzungen für eine reproduzierbare Messung (**Kuster et al. 1993**). Auf diese Weise werden eine Reihe von marktüblichen GSM-Handys für den Betrieb im D-Netz untersucht. Die Messwerte derartiger Untersuchungen zeigen, dass die SAR-Werte, bezogen auf 1 g der simulierten Gehirnmasse, bei einer vorgesehenen Anwendung mit ausgezogener Handy-

Antenne zwischen 0,1 und 1,59 W/kg variieren (**Tegenfeld 1999**).

Hombach et al. (1996) kombinieren eine numerische Berechnung unterschiedlicher Komplexität mit einer Messung im homogenen und inhomogenen physikalischen Modell des Kopfes. Im numerischen Modell werden bis zu 13 unterschiedliche Gewebearten und ihre elektrische Eigenschaften berücksichtigt, wohingegen das experimentelle Phantom nur 5 unterschiedliche Gewebearten beinhaltet. Ein Vergleich für die homogene vereinfachte und die heterogene komplexe Modellierung beider Arten wird vorgenommen. Die höchsten SAR-Werte, bezogen auf ein Gewebevolumen von 1 cm³ und einen Strom im Testdipol von 100 mA, ergeben sich für homogene Anordnungen, und zwar bis zu 4,5 mW/cm³/100 mA bei der Integration über 1 g Gewebe und etwa 3 mW/cm³/100 mA bei der Mittelung über 10 g Gewebe. Die SAR-Werte der vereinfachten oder heterogenen Modelle liegen bis zu 10 % niedriger. In dieser Arbeit wird weiterhin der starke Einfluss der Größe und Geometrie des Kopfes auf die gemessenen SAR-Werte hervorgehoben.

Dimbylow et al. (1994) führen eine numerische hochauflösende dosimetrische Ermittlung der SAR im menschlichen Körper bei 900 MHz mit einer Voxel-Auflösung von 2 mm und ca. 500.000 Volumina-Elementen (Voxels) durch. Die Anatomie einzelner Gewebearten wird aus Kernspintomogrammen von Probanden oder Patienten übernommen, wobei bei der Berechnung 10 unterschiedliche Gewebearten mit ihren spezifischen dielektrischen und elektrischen Eigenschaften Berücksichtigung finden. Alternativ werden der Kopf eines einjährigen Kindes und der einer erwachsenen Person simuliert. Als Ergebnisse werden die spezifische Absorptionsraten in Auge und Gehirn pro 1 g und 10 g Körpermasse in Abhängigkeit von der Geometrie und Antennenlokalisierung präsentiert. Die aufgeführten Daten sind jeweils pro Watt Leistung berechnet. Die maximalen SAR-Werte, gemittelt über 10 g Gewebe, liegen um 900 MHz bei 3 W/kg und bei Mittelung über 1 g Gewebe bei 4,8 W/kg.

4.7 Zusammenstellung der Emissions- und Immissionsdaten

Benutzte Symbole und Abkürzungen

f	Frequenz, Frequenzspektrum
MOD	Modulation
PUL*	Pulshaltigkeit
FU	dominierende Anteile der Umhüllenden
P	maximale Sendeleistung
E	maximale elektrische Feldstärke in öffentlichen und privaten Bereichen
S	maximale Leistungsdichte in öffentlichen und privaten Bereichen
SAR	maximale Spezifische Absorptionsrate
GW	Grenzwert der 26. BImSchV

* Die Pulshaltigkeit ist als Verhältnis der mittleren Leistungsflussdichte der Umhüllenden in einem Frequenzbereich zwischen 1 Hz und 1 kHz und der mittleren Leistungsflussdichte des HF-Signals definiert.

Mobilfunk im D-Netz

f	: 890 - 960 MHz
MOD	: digital, GSM

Basisstation

PUL	: $< 10^{-3}$
FU	: 217 Hz und Oberwellen
P	: 10 - 30 W
E	: in 99 % unter 2 V/m, in wenigen Fällen bis 10 V/m (17 % des GW)
S	: $< 280 \text{ mW/m}^2$

Handy

PUL	: $1,5 - 10^{-3}$
FU	: 2 Hz, 8 Hz, 217 Hz und Oberwellen
P	: 2 W
E	: 40 V/m
S	: $< 2 \text{ W/m}^2$
SAR	: $< 2 \text{ W/kg}$

Mobilfunk im E-Netz

f : 1820 - 1860 MHz
MOD : digital, GSM

Basisstation

PUL : $< 10^{-3}$
FU : 217 Hz und Oberwellen
P : bis 20 W
E : < 6 V/m
S : $< 0,005$ W/m²

Handy

PUL : $1,5 - 10^{-3}$
FU : 2 Hz, 8 Hz, 217 Hz und Oberwellen
P : 1 W
E : 20 V/m
S : < 1 W/m²
SAR : < 1 W/kg

Mobilfunk UMTS

f : 1900 - 2000 MHz
MOD : digital, CDMA

Basisstation

PUL : $< 10^{-5}$
FU : oberhalb von 8 Hz
P : vergleichbar mit E-Netz
E : vergleichbar mit E-Netz
S : vergleichbar mit E-Netz

Handy

PUL : ca. 10^{-5}
FU : 0,2 – 8 Hz
P : vergleichbar mit E-Netz
E : vergleichbar mit E-Netz
S : vergleichbar mit E-Netz
SAR : vergleichbar mit E-Netz

Schnurlostelefon DECT/ Ladestation

f : 1850 MHz
MOD : digital, DECT-Standard
PUL : $< 10^{-3}$
FU : 100 Hz und Oberwellen
P : 250 mW
E : < 8 V/m
S : < 170 mW/m² (1,8 % des GW)
SAR : $< 0,1$ W/kg

WLAN

f : 2400 MHz – 2485 MHz
MOD : digital
PUL : wird durch Protokoll bestimmt
FU : 10-400 Hz
P : 100 mW
E : < 1 V/m
S : < 100 mW/m²

Bluetooth

f : 2400 MHz
MOD : digital
PUL : abhängig vom Protokoll
FU : 10 – 400 Hz
P : 1, 2, 5 und 100 mW
S : < 100 mW/m²
E : < 2 V/m

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Daten der geläufigsten Mobilfunksysteme zusammengefasst.

Art			Frequenz in MHz	Modulation	Pulshaltigkeit	Frequenz- anteile – FU in Hz	Sende- leistung in W	Elektrische Feldstärke in V/m		SAR in W/kg
								Typisch im Alltag	Zul. nach 26. BImSchV	
Mobilfunk	D-Netz	Basisstation	890 bis 960	digital	$< 10^{-3}$	217 und Oberwellen	< 30	< 10	42	$< 0,01$
		Handy		GSM	$1,5 \cdot 10^{-3}$	2, 8 und 217	< 2	< 40	*	< 2
	E-Netz	Basisstation	1820	digital	$< 10^3$	217 und Oberwellen	< 20	< 6	60	$< 0,005$
		Handy		1860	GSM	$1,5 \cdot 10^{-3}$	2, 8 und 217	< 1	< 20	*
	UMTS	Basisstation	1900	digital	$< 10^{-5}$	> 8	< 20	< 6	60	$< 0,005$
		Handy		2000	CDMA	$< 10^{-5}$	0,5 - 8	< 1	< 20	*
Schnurlos- telefon	Station	1850	Digital DECT	$< 10^{-3}$	100 und Oberwellen	0,25	< 8	60	$< 0,3$	
	Mobilteil									
WLAN			2400 bis 2485	digital	Protokoll- abhängig	10 bis 400	0,1	< 1	62	$< 0,1$
Bluetooth			2400	digital	Protokoll- abhängig	10 bis 400	$< 0,1$	< 1	62	$< 0,1$

Tab. 1 Zusammenfassung typischer Emissions- und Immissionsdaten

* gehört nicht zum Geltungsbereich

5. Arten und Aussagekraft biologisch-medizinischer Untersuchungen

Grundsätzlich kann zwischen folgenden Untersuchungsarten unterschieden werden:

- a) epidemiologische Studien
- b) Provokationsstudien
- c) Tierexperimente
- d) Untersuchungen im Reagenzglas (in vitro).

Nur die epidemiologischen und Provokationsstudien können direkt am Menschen durchgeführt werden, wenn die ethischen Voraussetzungen erfüllt sind. Mit Untersuchungen an Probanden und Patienten ist der meist gesuchte direkte Bezug zu Menschen und zur jeweiligen Situation am besten erfüllt. Die praktische Durchführung der Studien nach a. und b. bringt leider eine Reihe von systematischen und zufälligen Unsicherheiten und Einschränkungen mit sich, wie in den nächsten Unterabschnitten angedeutet.

5.1 Epidemiologische Studien

Die Epidemiologie untersucht mit statistischen Erhebungen die Häufigkeit von Erkrankungen in der Bevölkerung und Faktoren, die diese Verteilungen beeinflussen. Damit ist diese Methodik geeignet, die erste Prüfung vorzunehmen, ob und inwieweit z.B. die Einführung von Mobilfunkfeldern mit der Erhöhung der Häufigkeit irgendwelcher Erkrankungen in statistischem Zusammenhang steht. Auf diese Weise können nur Hinweise auf eventuelle statistische Assoziationen gewonnen werden. Ob die Felder die tatsächliche Ursache für eine Erkrankung sind, kann nur in Tierexperimenten und in Reagenzglasuntersuchungen überprüft werden.

5.1.1 Arten der epidemiologischen Untersuchung

Bei epidemiologischen Studien gibt es verschiedene Klassifizierungen. Die geläufigsten Typen sind:

- Inzidenz-Studie (ökologischer Ansatz),
- Fall-Kontroll-Studie und
- Kohorten-Studie.

In der Inzidenz-Studie wird ermittelt, inwieweit die Design-Exposition einer Bevölkerungsgruppe, z. B. einer Gemeinde, mit der Häufigkeit des Auftretens (Inzidenz) einer bestimmten Erkrankung statistisch in Verbindung steht. Die genauen Expositionsverhältnisse individueller Personen werden dabei nicht berücksichtigt. Die Inzidenz-Studie ist mit einem relativ geringen zeitlichen Aufwand verbunden, da einzelne Personen der mindestens zwei Versuchsgruppen mit vermeintlich unterschiedlicher Exposition nicht in Kontakt miteinander stehen und nicht im Detail überprüft werden müssen. Nachteile sind die Unschärfe in Bezug auf die Exposition und sowie die Schwierigkeit, mögliche Einflussfaktoren (confounder) zu erfassen.

In einer Fall-Kontroll-Studie werden einer Gruppe von Patienten mit einer bestimmten Erkrankung eine oder mehrere Bevölkerungsgruppen (Kontrollen) ohne diese Erkrankung gegenüber gestellt. Statistische Vergleiche dieser Gruppe sollen zeigen, in wie weit ein Einflussfaktor, z.B. elektromagnetische Felder, das Auftreten einer bestimmten Erkrankung erhöht. Als Ergebnis wird eine so genannte Odds Ratio (OR) berechnet, die das relative Risiko eines Einflussfaktors ausdrückt. $OR = 1$ bedeutet, dass zwischen der Fall- und der Kontrollgruppe keine Unterschiede festgestellt wurden. Die Voraussetzung für sichere Ergebnisse ist eine repräsentative Auswahl der Fall- und Kontrollgruppen. Ist dies nicht der Fall ist, entstehen verschiedene Fehler, die in der Studie systematisch zu falschen Resultaten führen.

Beim Kohorten-Ansatz geht man von der Feldexposition als einem Einflussfaktor aus und ermittelt daraus resultierende, ggf. mehrere, gesundheitliche Konsequenzen. Die Studie kann retrospektiv oder prospektiv vorgenommen wer-

den. Ein wesentlicher Nachteil dieser Studie ist der damit verbundene hohe Arbeitsaufwand. Zur Erkennung von schwachen Einflüssen muss eine große Anzahl von Personen, z. T. auch gesunde Menschen, über lange Zeiträume hinweg beobachtet werden.

Eine allgemeine epidemiologische Studie, die einen eventuellen Zusammenhang zwischen den im Alltag vorhandenen hochfrequenten elektromagnetischen Feldern und den unterschiedlichen Erkrankungen der exponierten Bevölkerung überprüft, ist nicht möglich, da wegen der Allgegenwärtigkeit hochfrequenter Felder und der hohen Anzahl der verschiedenartigen Erkrankungen und Einflussfaktoren keine homogenen Fall- und Kontrollgruppen aufgestellt werden können.

Deshalb setzen sich die bisher durchgeführten epidemiologischen Untersuchungen mit der Überprüfung nur einer statistischen Beziehung zwischen der Exposition durch bestimmte, nicht in allen Lebensbereichen des Alltags vorhandene, elektromagnetische Felder und der Mortalität oder der Inzidenz von unterschiedlichen Krebserkrankungen und der Häufigkeit von unspezifischen Symptomen bei Mensch und Tier auseinander.

5.2 Provokationsstudien

Zur Überprüfung reversibler Effekte in elektromagnetischen Feldern ohne wesentliche Beeinträchtigung der Testperson können in vorteilhafter Weise Provokationsstudien durchgeführt werden. Dabei kann z.B. die Existenz von benannten Symptomen im elektromagnetischen Feld direkt an der betroffenen Person überprüft werden. Die Testpersonen müssen über eventuelle Risiken der Untersuchung aufgeklärt sein und sie müssen der Untersuchung schriftlich zustimmen. Insbesondere bei subjektiv wahrgenommenen und von der Testperson berichteten Effekten spielt die psychische Komponente eine große Rolle. Deshalb werden so genannte Blinduntersuchungen durchgeführt, bei denen die Versuchsperson nicht weiß, wann das Feld

ein- oder ausgeschaltet ist. Um auch einer Einflussnahme des Versuchsleiters auf die Ergebnisse vorzubeugen, sind so genannte Doppelblindversuche vorzuziehen. Um Zufallsergebnisse zu vermeiden, werden mehrere Phasen mit und ohne Feld, am besten in randomisierten Sequenzen, wiederholt und die Antworten statistisch bewertet.

5.3 Tierexperimente

Untersuchungen, bei denen die körperliche und organische Unversehrtheit nicht gewährleistet werden kann, dürfen nicht am Menschen vorgenommen werden.

Für derartige Studien sind die Tierexperimente die erste Wahl. Trotz der großen Ähnlichkeit tierischer Organismen muss die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Tierexperiment auf den Menschen vom sachkundigen Fachmann geprüft werden. Biologische Variabilität und unzählige Einflussfaktoren bewirken eine Schwankung aller Kennwerte des Organismus. Zur verlässlichen statistischen Analyse müssen deshalb genügend umfangreiche Tiergruppen herangezogen werden, weshalb häufig, wegen ihrer geringen Größe, kleine Tiere wie Ratten oder Mäuse zur Anwendung kommen. Zum Vergleich wird eine Gruppe ohne Exposition und eine mit Exposition unter ansonsten gleichen Bedingungen gehalten. Wichtig ist, dass die Tiere aus der gleichen Zucht kommen, da je nach der Abstammung unterschiedliche Reaktionen auftreten können. Die notwendige Größe der Gruppen hängt von ihrer Homogenität und der Stärke des zu erwartenden Effektes ab. Je kleiner die Effekte ausfallen, desto größer müssen die Gruppen gewählt werden; für den – praktisch nicht durchführbaren – Nachweis einer Nullwirkung müssten sogar unendlich viele Tiere herangezogen werden.

5.4 Reagenzglasuntersuchungen (in vitro)

In vitro Untersuchungen ermöglichen nicht nur, Effekte in großen Reihen zu überprüfen, sie bieten auch die Möglichkeit, den Wirkungsmechanismen schrittweise nachzugehen. Damit eignen sie sich insbesondere zur Verifikation bekannter Effekte und zur Erforschung ihrer Ursächlichkeit. Herangezogen werden humane oder tierische Zelllinien, die im Experiment in exponierte und

nichtexponierte Proben eingeteilt werden. Zur Überprüfung der Vitalität der verwendeten Zellen werden zusätzliche Proben, so genannte positive Kontrollen, gebildet, die mit einem bekannten Faktor behandelt werden. Die Übertragbarkeit der zuerst in in vitro-Untersuchungen belegten Effekte muss in den meisten Fällen etappenweise zunächst im Tierexperiment bestätigt werden, bevor bei Menschen die Wirksamkeit getestet wird.

6. Krebsrisiko in hochfrequenten Feldern

6.1 Aspekte des Krebsgeschehens

In Deutschland erkranken jährlich insgesamt etwa 350.000 Menschen an Krebs, wobei mehr als 250.000 Erkrankte über 60 Jahre sind. Damit wird klar, dass Krebs vor allem eine Alterskrankheit ist. Krebs ist nicht nur in Deutschland, sondern in den meisten westlichen Industrieländern die zweithäufigste Todesursache nach den Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems.

Die vorliegenden Kenntnisse über die Entstehung, den Verlauf und eine mögliche Therapie sind trotz aller wissenschaftlichen Fortschritte noch sehr lückenhaft. Deshalb ist es verständlich, dass viele Menschen die Frage stark bewegt, welche Ursachen für das Krebsgeschehen verantwortlich sind und welche Gegenmaßnahmen getroffen werden können. Ein grundlegendes Verständnis des Erkrankungsprozesses ist wegen der Komplexität des Krebsgeschehens noch nicht vorhanden, und dieses Ziel wird wohl auch in den nächsten Jahren nicht erreicht werden. Als gesichert gilt aber, dass nicht nur eine Ursache, sondern mehrere Faktoren zur Entstehung und Entwicklung von Krebserkrankungen führen. Eine Reihe von Untersuchungen hat übereinstimmend gezeigt, dass verschiedenartige Umwelteinflüsse, Lebensgewohnheiten sowie technische und zivilisatorische Belastungen als Risikofaktoren beim Krebsgeschehen aufgeführt werden können.

Wissenschaftlich steht fest, dass das Krebsgeschehen seinen Ursprung in der Veränderung oder Schädigung der genetischen Information in der Zelle hat. Eine wesentliche Rolle spielen dabei bestimmte Abschnitte des Erbgutes, die so genannten Onkogene, die nicht nur in der Krebszelle, sondern auch im normalen Zellkern vorkommen. Die Mutation ist ein Vorgang zu Beginn eines Prozesses, der zur Entstehung von Krebs führt. Alle bisherigen Ergebnisse sprechen dafür, dass es sich bei der Karzinogenese um einen mehrstufigen Prozess handelt, bei dem Proto-Onkogene durch eine Veränderung

der DNA aktiviert werden. Die Veränderung der DNA kann an zahlreichen Stellen und auf verschiedene Weise erfolgen. Demnach unterscheidet man zwischen Gen-Mutationen, Chromosomen-Mutationen und Genom-Mutationen. Jede Zelle verfügt über enzymatische DNA-Reparaturmechanismen, die die Schäden bis zu einem gewissen Grad richtig und vollständig reparieren können. Sind die Schäden nicht reparabel, stirbt die Zelle ab oder sie kann sich unkontrolliert vermehren. Die genauen molekularen und zellulären Vorgänge in der Zelle bei der Krebsentstehung und Krebsentwicklung sind allerdings nicht ausreichend bekannt. Im Groben wird zwischen den Phasen der Initiation, der Promotion und der Progression unterschieden.

Elektromagnetische Wellen werden ebenfalls als Risikofaktor bei der Entstehung bzw. Promotion des Krebsgeschehens verdächtigt. Dies gilt insbesondere für die ionisierenden elektromagnetischen Strahlen, die durch ihre hohe elementare Energie die Bindung zwischen einzelnen Atomen und Molekülen der DNA auflösen und damit initiale Schäden verursachen können.

Die Forschung hat sich in den letzten 20 Jahren sehr intensiv mit den postulierten Wirksamkeiten der nichtionisierenden elektromagnetischen Felder auf das Krebsgeschehen auseinandergesetzt. Die ersten Hinweise aus der Epidemiologie bezogen sich auf eine mutmaßliche Karzinogenese durch niederfrequente elektromagnetische Felder. Inzwischen werden sehr spezifische Untersuchungen zur diskutierten Beeinflussung des Krebsgeschehens in niederfrequenten wie auch in hochfrequenten elektromagnetischen Feldern vorgenommen. Da bis heute keine allgemein akzeptierte Vorstellung über die eventuellen Wirkungsmechanismen dieser Felder auf die Karzinogenese vorliegt, müssen in vitro- und in vivo-Untersuchungen durchgeführt werden, die auch die einzelnen Schritte der Zellreplikation überprüfen.

Die Literatur zu diesem Thema wird entsprechend der Aussagekraft der verschiedenen Untersuchungsarten zum Endpunkt "Krebs beim Menschen" in hochfrequenten Feldern des Alltags abgehandelt.

6.2 Epidemiologische Studien zum Krebsrisiko bei Nutzern von Mobilfunk-Handys

Hardell et al. (2003) führen eine Fall-Kontroll-Studie über Hirntumore im Zusammenhang mit der Nutzung von Schnurlos- und Mobilfunktelefonen bei 1617 Patienten im Alter zwischen 20 und 80 Jahren durch. Jedem Fall wurde eine gepaarte Kontrolle aus dem schwedischen Bevölkerungsregister zugeordnet. Die Exposition durch die Telefone wurde anhand der Angaben in Fragebögen geschätzt. Auf die gleiche Weise wurden auch die sozioökonomischen Faktoren der Fälle und Kontrollen ermittelt. Die Analyse ergibt keine statistisch signifikante Erhöhung des Risikos eines Hirntumors für die Nutzer von Schnurlostelefonen und digitalen GSM-Handys. Der Nutzung analoger Geräte lässt sich mit $OR=1,3$ (95%, KI 1,04 - 1,6) eine schwache Erhöhung des relativen Risikos zuordnen.

Der Seitenvergleich der Handy-Nutzung und der Tumoren liefert $OR=1,7$ für analoge, $OR=1,3$ für digitale und $OR=1,2$ für Schnurlostelefone bei ipsilateraler (gleiche Seite des Handy-Anlegens und des Tumors) Zuordnung. Für diese Zuordnung ergibt sich der höchste OR-Wert von 1,8 für alle drei Handy-Typen und Astrozytom. Die ipsilaterale Exposition scheint in der Tendenz kürzere Perioden der Tumor-Induktion zu verursachen.

Warren et al. (2003) führen eine Fall-Kontroll-Studie zum Einfluss überwiegend analoger Handys auf die Häufigkeit intratemporaler Tumoren des Gesichtsnerven (IFN) durch. Dabei wurden Patienten mit IFN (18) gepaart verglichen mit Kontrollgruppen aus Patienten, die an akustischem Neurom (51) oder gastroösophagealem Reflux (69) leiden. Zur Gewinnung fallspezifischer Faktoren werden die Patienten befragt.

Die Arbeitshypothese ist, dass IFN durch eine stärkere Handy-Exposition häufiger vorkommen als andere Tumoren. Die Auswertung ergibt für das relative Risiko ein $OR=0,6$ (95 %, KI 0,2 - 1,9). Keiner der definierten Faktoren ist mit IFN-Tumoren assoziiert. Als Schwäche der Studie wird von den Autoren eine angesichts der langen Latenzzeit dieser Tumorart zu kurze Nutzungsdauer der Handys (5 bis 10 Jahre) angeführt.

Hardell et al. (2003) publizieren eine Fall-Kontroll-Studie über den Einfluss überwiegend analoger Handys auf die Hirntumoren. Die Studie umfasst 1617 Fälle von Hirntumoren, die zwischen den Jahren 1997 und 2000 in Schweden diagnostiziert wurden. Jeder Fall wurde mit einer Kontrolle aus dem Bevölkerungsregister gepaart. Ein erhöhtes $OR=3,45$ (95%, KI 1,71 - 6,76) hat sich nur für Patienten mit vestibulärem Schwannom (VS) und Nutzern von analogen Handys ergeben. In der Zeit zwischen 1960 und 1998 erhöht sich die auf das Alter standardisierte Inzidenz von VS um 2,53 %, wogegen bei anderen Tumoren nur ein Anstieg um 0,8 % festgestellt wird.

Auvinen et al. (2002) präsentieren eine registerbasierte Inzidenz-Fall-Kontroll-Studie über Hirntumore bei Nutzern von tragbaren Mobilfunktelefonen. 399 Patienten mit Hirntumor (198 Gliome, 129 Meningiome, 72 andere Tumore einschließlich Lymphomen) und 34 Patienten mit Speicheldrüsentumor, werden aus dem finnischen Krebsregister für das Jahr 1996 ausgesucht. Jeder Patient wird anhand eines Bevölkerungsregisters mit 5 Kontrollen gepaart. Zusätzlich werden 32 Gliom-Fälle mit Handy-Nutzung mit der gleichen Anzahl Gliom-Patienten ohne Handy-Nutzung verglichen. Der Typ und die Nutzungsdauer der Handys wird den Angaben der Betreiber entnommen. Nur etwa 11 bis 13 % der Fälle und Kontrollen haben ein Handy über 2 Jahre verwendet, weshalb nur kleine Gruppen zum Vergleich zur Verfügung stehen. Insgesamt resultiert eine vergleichbare $OR=1,3$ (95 %, KI 0,9 - 1,8) für Hirntumore und $OR=1,3$ (95%, KI 0,4 - 4,7) für Tumore in der Speicheldrüse. In keiner Tumorklasse ergibt sich ein signifikanter Befund für digitale Handys. Nur das Gliom zeigt

mit $OR=2,1$ eine schwache Assoziation mit analogen Handys, die OR -Werte für andere Tumore liegen um 1. Auch die Analyse nach Lokalisation von Tumoren (Ohr und Seitigkeit der Handy-Nutzung) ergibt keinen statistisch signifikanten Zusammenhang.

Muscat et al. (2002) stellen eine patientenbasierte Fall-Kontroll-Studie mit 90 Patienten mit Akustikusgeschwulst und mit 86 Patienten mit anderen Erkrankungen vor. Die Diagnose der Erkrankungen wurde in den USA zwischen 1997 und 1999 vorgenommen. 20 % der Fälle und 27 % der Kontrollen haben eine durchschnittliche Nutzung eines überwiegend analogen Handys über 4,1 bzw. 2,2 Jahre gemeldet. Die Bewertung ergibt keine Assoziation (OR um 1) zwischen der Seitigkeit der Tumoren und der Handy-Nutzung.

Hardell et al. (2002) publizieren eine Fall-Kontroll-Studie der Prävalenz bei 1303 Patienten mit Hirntumoren und eine gleiche Zahl gepaarter Kontrollen. Die Fälle wurden aus dem schwedischen Krebsregister entnommen und zwischen 1997 und 2000 diagnostiziert. Die statistische Bewertung ergibt keine Assoziation zwischen der Nutzung analoger und digitaler Handys und malignen Tumoren. Eine schwache Erhöhung ($OR=1,3$) ergibt sich für alle Tumoren und analoge Handys nur bei einer Nutzungsdauer über 1 Jahr, aber nicht über 5 Jahre. Ein signifikanter Zusammenhang, $OR=3,5$ (95%, KI 1,8 - 6,8), resultiert aus dem Vergleich Akustikusgeschwulst und analoge Handys. Eine grenzwertige Beziehung mit $OR=1,3$ ergibt sich für mehr als fünfjährige Nutzung von Schnurlos-telefonen und allen Tumoren. Insgesamt konnte keine Abhängigkeit zwischen der Dauer der Exposition bzw. Nutzungsdauer der Handys und der Häufigkeit der Tumoren gefunden werden.

Die Analyse der Seitigkeit der Tumore und Handy-Nutzung liefert eine $OR= 1,8$ für analoge Handys, eine $OR=1,3$ für Schnurlos-telefone für die gleiche ipsilaterale Anordnung. Allerdings liegen die OR -Werte auf der gegenüberliegenden Seite (contralateral) deutlich unter 1. Es wäre aber abwegig, deswegen anzunehmen, dass die Felder der Handys eine Reduktion der

Tumore auf der contralateralen Seite ausüben. Vielmehr handelt es sich um einen systematischen Fehler, der auch bei anderen Ergebnissen berücksichtigt werden muss.

Johansen et al. (2002) untersuchen in ihrer Studie von 2001, ob ein Zusammenhang zwischen der Nutzung von Handys und Augentumoren besteht. In der untersuchten Gruppe von 420000 Handy-Nutzern wurden 8 Fälle von Okulartumoren festgestellt. Durchschnittlich könnten 13,5 Fälle erwartet werden, woraus eine $OR=0,59$ (95%, KI 0,25 - 1,17) resultiert. Damit wird die Assoziation zwischen der Handy-Nutzung und dem Aufkommen von Augentumoren durch diese Ergebnisse nicht gestützt.

Johansen et al. (2001) führen eine retrospektive Kohorten-Studie über die Inzidenz von Tumoren bei 420095 Benutzern von Handys in den Jahren 1982 bis 1995 durch. Als Vergleich wird die typische Inzidenz der Tumoren in der dänischen Bevölkerung an Hand eines Registers herangezogen. In der Kohorte wurden 3391 Tumoren ermittelt, diesem Ergebnis steht die Zahl von 3825 erwarteten Fällen gegenüber. Die statistisch signifikante Absenkung der Krebsrate bei Handy-Benutzern ist besonders deutlich bei den Lungentumoren von Rauchern. Trotzdem kann von diesem Ergebnis keineswegs abgeleitet werden, dass die Handy-Nutzung etwa die nachweislich gesundheitsschädigende Wirkung des Rauchens kompensieren könnte. In der Inzidenz von Gehirn- und Drüsentumoren sowie Leukämie sind keine statistischen Unterschiede zwischen der allgemeinen dänischen Bevölkerung und Handy-Benutzern zu finden. Auf Grund dieser Ergebnisse wird eine mutmaßliche Beeinflussung des Krebsgeschehens durch die Felder von Handys in Frage gestellt.

Inskip et al. (2001) präsentieren eine Fall-Kontroll-Studie über intrakranielle Tumoren bei Nutzern analoger Handys in den Jahren 1994 bis 1998. Insgesamt wurden 782 Krebspatienten (489 mit Gliom, 197 mit Meningiom und 86 mit Akustikus-Neurom) sowie 799 Patienten ohne Tumoren registriert. Das relative Risiko für die kumulative Nutzung von Handys liegt bei mehr als 100 Stunden Nutzung bei 0,9 für das Gliom,

0,7 für das Meningiom und 1,4 für das Akustikus-Neurom. Im Durchschnitt beträgt das relative Risiko 1,0 und spricht damit gegen jegliche Korrelation zwischen den Feldern der Handys und Gehirntumoren bei einer Nutzungsdauer von unter 100 Stunden. Die Tatsache, dass die Tumoren nicht überwiegend auf der Seite der Handy-Nutzung entstehen, spricht ebenfalls gegen eine solche Assoziation.

Stang et al. (2001) untersuchen im Rahmen einer Fall-Kontroll-Studie, in wie weit die Häufigkeit von Uveal-Melanomen durch die Benutzung von Handys erhöht wird. Dabei werden 118 Patienten mit Uveal-Melanom und 475 Kontroll-Patienten ohne diese Krebserkrankung nach Geschlecht gruppiert verglichen. Die Exposition durch die Felder der tragbaren Mobiltelefone wird an Hand von Befragungen grob unterteilt. Die Ergebnisse liefern mit $OR=3,0$ (95 %, KI 1,4 - 6,3) Hinweise auf ein erhöhtes Risiko für das Auftreten von Uveal-Melanomen bei den Benutzern von Handys. Die Autoren selbst warnen jedoch vor einer Überbewertung dieser Ergebnisse auf Grund der vielen methodischen Unzulänglichkeiten der Untersuchung.

Muscat et al. (2000) führen in den USA eine Fall-Kontroll-Studie an 469 Männern und Frauen im Alter von 18 bis 80 Jahren mit primären Hirntumoren durch. Die ausgesuchte Kontrollgruppe besteht aus 422 Patienten ohne Hirntumoren. Dabei wird die Benutzung von analogen Handys im Zeitraum zwischen 1994 und 1998 betrachtet. Es wird eine 2,5- bzw. 2,2-stündige Benutzung des Handys für die Fallgruppen bzw. Kontrollgruppen angenommen. Die berechneten OR-Faktoren liegen für die meisten Hirntumoren bei unter 1. Hirntumoren zeigen sich bei Handy-Benutzern zwar häufiger, die Ergebnisse sind jedoch statistisch nicht signifikant. Eine ähnliche nicht signifikante Tendenz zeigt sich für temporale und okzipitale Lobus-Tumoren. Nur bei dem selten vorkommenden Neuroepitheliom ergibt sich ein relatives Risiko von $OR = 2,1$ (95 %, KI 0,9 - 4,7). Insgesamt bestätigt die Studie nicht den aufgestellten Zusammenhang zwischen Handy-Feldern und Hirntumoren.

Hardell et al. (1999) führen eine Fall-Kontroll-Studie an Patienten mit unterschiedlichen Ge-

hirntumoren in der schwedischen Bevölkerung durch. Insgesamt werden 270 Tumorpatienten aus den Jahren 1994 bis 1996 an Hand des Krebsregisters und 420 Kontrollen bei Patienten im Alter zwischen 20 und 89 Jahren bewertet. Von 209 untersuchten Patienten mit Gehirntumoren haben 78, und von 425 Kontrollen haben 161 digitale GSM- oder analoge NMT-Handys verwendet. Die Dauer der Exposition wird an Hand von Interviews geschätzt. Die histopathologische Zuordnung der Tumoren sowie die Angaben über ihre anatomische Lokalisation werden den Krankenakten entnommen. Der statistische Vergleich der Daten für Hirntumore ergibt für alle Nutzer von Handys ein relatives Risiko von 0,98, wobei für die digitalen GSM-Systeme ein Wert von 0,97 und für die analogen NMT-Anlagen ein Wert von 0,94 gilt. Der Vergleich der Tumorfrequenz im temporalen und okzipitalen Lobus sowie zwischen der Handy-exponierten und nichtexponierten Seite des Gehirns ergibt zwar ein erhöhtes Risiko für die Benutzer analoger Modelle, die Unterschiede sind aber statistisch nicht signifikant. Die Aussagekraft dieser Studie wird gemindert durch die geringe Anzahl von Patienten in einzelnen Gruppen, die nach Art der Tumorerkrankung, Lokalisation des Tumors und Geschlecht der Patienten unterteilt werden. Der nicht erläuterte Ausschluss von mehr als 10 % der Patienten von der Auswertung der Daten wirft ebenfalls einen Schatten auf diese Studie. Schließlich ist die Expositionszeit sehr grob geschätzt und sie ist bei einer Reihe von Krebserkrankungen mit einer langen Latenzzeit zu kurz, um eine abschließende Beurteilung abgeben zu können.

Dolk et al. (1997) führen eine kleine ökologische Studie der Krebsinzidenz in der Umgebung von UKW- und Fernseh-Sendern durch. Die Studie bezieht sich auf die Jahre 1974 bis 1986. Als Grundlage dient ein Krebsregister. Betrachtet werden Kinder- und Erwachsenen-Leukämie sowie Haut- und Blasenkarzinome. Im Umkreis von 10 km wurden 3305 Fälle von Erwachsenen-Leukämie festgestellt. Im Vergleich zu der typischen Inzidenz in der Bevölkerung resultiert eine OR von 1,09 (95 %, KI 1,00 - 1,07). Für andere Krebserkrankungen konnte kein statistisch signifikanter Anstieg gefunden werden. Die

Resultate bestätigen nicht den früher gemeldeten Einfluss der UKW- und Fernseh-Sender auf die Karzinogenese der betrachteten Tumoren.

Hocking et al. (1996) untersuchen die Krebsinzidenz und Krebsmortalität in der Umgebung eines Fernsehsenders. Es werden Daten aus dem Krebsregister von Gemeinden für die Jahre 1972 bis 1990 gesammelt und bewertet. Drei Gemeinden befinden sich in der unmittelbaren Nähe des Senders, die restlichen sechs Gemeinden sind weiter entfernt. Die Leistungsdichte der Felder wird durch Berechnung auf 8 W/cm^2 für die Nähe zum Sender, $0,2 \text{ W/cm}^2$ für einen Radius zwischen 4 und 12 km und auf $0,02 \text{ W/cm}^2$ für größere Entfernungen von der Antenne ermittelt. Das relative Risiko beträgt bei Leukämie $RR = 1,4$ (95 %, KI 1,00 - 2,49) für Inzidenz und $RR = 2,74$ (95 %, KI 1,42 - 5,27) für Mortalität. Die Inzidenzrate der Kinder-Leukämie liegt bei 1,58 (95 %, KI 1,07 - 2,34) und bei 2,32 (95 %, KI 1,35 - 4,01) für Mortalität. Eine besondere Ausprägung zeigt die lymphatische Kinder-Leukämie mit $RR = 1,55$ (95 %, KI 1,00-2,41) für Inzidenz und $RR = 2,74$ (95 %, KI 1,42 - 5,27) für Mortalität. Die entsprechenden Werte für Gehirntumoren waren in allen Gruppen vergleichbar. Von den Ergebnissen wird eine Assoziation zwischen Feldern der Fernsehsender und Kinder-Leukämie abgeleitet. Allerdings können wegen der pauschalen und groben Zuweisung der Expositionsstärke große Fehler vermutet werden.

Rothman et al. (1996) führen eine Kohortenstudie an 256000 Nutzer aller Arten von tragbaren und mobilen Telefonen im Osten der USA durch. Davon entfallen 65 % auf Männer im Durchschnittsalter von 42 Jahren und 35 % auf Frauen mit einem Durchschnittsalter von 41 Jahren. Obwohl in der Studie nicht explizit aufgeführt, lässt sich aus anderen Quellen ableiten, dass es sich bei den Handys vorwiegend um analoge Systeme im Frequenzbereich zwischen 804 und 894 MHz mit einer Leistung von 0,6 W bei tragbaren Geräten und 3 W bei Auto-Anlagen handelt. Als Berechnungsgrundlage für die Expositionsdauer der einzelnen Nutzer durch die Handy-Felder werden die Telefonrechnungen herangezogen; Häufigkeit und Gewohnheiten der Nut-

zung versucht man mit Hilfe von Fragebogen und Interviews von den Handy-Benutzern zu ermitteln. Für die Überprüfung eines eventuellen Zusammenhangs zwischen der Feldexposition und der Sterblichkeitsrate wird die Mortalität in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht der betreffenden Personen zusammen getragen und aufgestellt. Bewertet wird die Differenz zwischen der Mortalität der Benutzer von mobilen und Handtelefonen, wobei im Falle der mobilen Anlagen von einer wesentlich schwächeren Exposition ausgegangen wird. Die Nutzer der mobilen Funkanlagen werden als Kontrollgruppe herangezogen. Für die Handtelefone wird eine maximale SAR im Gehirn von bis zu $1,9 \text{ W/kg}$, bezogen auf 1 g Körpermasse, geschätzt, wohingegen für die mobilen Telefone keine genauen Angaben gemacht werden. Obwohl mehr als 1000 Tote in der betrachteten Kohortengruppe ermittelt werden, gehen nur 604 Tote, die im Jahr 1994 verstorben sind, in die statistische Auswertung ein. Die Mortalität steigt in beiden Gruppen erwartungsgemäß mit dem Alter der Personen stark an, wobei die gesamte Mortalität mit der Zeit der Nutzung von mobilen Fernsprechanlagen paradoxerweise abnimmt. Das relative Risiko der Handy-Besitzer liegt bei 0,93 nach zweijähriger und bei 0,86 nach dreijähriger Benutzung von Handys. Ein Vergleich zwischen den Nutzern von mobilen und tragbaren Geräten zeigt keine statistisch signifikante Differenz zwischen beiden Gruppen.

Der Wert dieser Studie wird durch folgende Unzulänglichkeiten gemindert:

- Es fehlen Angaben über die Todesursachen, inwieweit es sich dabei z.B. um Gehirntumoren handelt.
- Die tatsächliche Expositionsdosis (Stärke x Dauer) ist nur grob geschätzt, große Fehler sind nicht auszuschließen.
- Die einjährige Erfassungsphase muss als zu kurz angesehen werden.
- Es fehlen jegliche soziodemographische Angaben über die Kohorte.
- Die Expositionsdauer der Handy-Besitzer könnte im Vergleich zur Latenzzeit einiger Krebsarten zu niedrig sein.

6.3 Einfluss von Mikrowellen auf die Karzinogenese in Tierexperimenten

Der direkte Beweis einer karzinogenen Einflussnahme toxischer Chemikalien, ionisierender oder auch nichtionisierender elektromagnetischer Strahlen und Felder, des Rauchens oder von Asbest auf das Krebsgeschehen ist nur in Tierexperimenten zu erbringen. Dazu wurden verschiedene Modelle ausgearbeitet, die in Vergleichsuntersuchungen mit und ohne Einwirkung der verdächtigen Substanz oder der physikalisch/chemischen Größen auf

- die spontane Inzidenz tierspezifischer Tumoren
- die Tumorinzidenz genetisch manipulierter Tiere
- die Promotion und Progression der in Tieren chemisch oder über Strahlung induzierten Tumoren und schließlich
- die Promotion und Progression der in Tieren implantierten Tumoren

die eventuelle Karzinogenität aufzeigen können. Bei jedem dieser Modelle werden bestimmte Vor- und Nachteile gesehen, so dass für die Anwendung bei der Untersuchung eventueller karzinogener Wirkungen der hochfrequenten Felder und Mikrowellen keines dieser Modelle favorisiert werden kann.

Die spontane Tumorinzidenz, die unter standardisierten Versuchsbedingungen mit und ohne Feldeinwirkung des Feldes ermittelt wird, liefert die beste Basis für die Beurteilung, da die wesentlichen Einflussfaktoren stark reduziert werden können. Auf der anderen Seite sind in diesem Modell wegen der relativ niedrigen Tumorinzidenz gesunder Tiere und der langen Latenzzeit der meisten Tumoren umfangreiche und zeitintensive Experimente erforderlich, damit eine ausreichende statistische Basis gewährleistet ist.

Umfang und Dauer einer Studie zur Karzinogenität können wesentlich verringert werden, wenn die Versuchstiere zur Einleitung des Tumorgeschehens mit karzinogenen Stoffen oder Mitteln vorbehandelt werden. Der Nachteil dieser Me-

thode ist, dass auf diese Weise eine schwer kalkulierbare Schädigung des Körpers induziert wird, die die Ergebnisse sehr unterschiedlich beeinflussen kann. Dadurch werden die Interpretation der Resultate und ihre Übertragbarkeit auf den Menschen erschwert.

Experimente mit implantierten Tumorzellen bringen ebenfalls eine große Unsicherheit mit sich, da das Entwicklungsstadium der implantierten Tumorzellen sowie die Implantationslage und die Karzinogenitätsanlage des Tieres schwer standardisierbar sind.

Die besten Aussichten für die Zukunft zeigen Modelle mit genetisch manipulierten Tieren. Diese Methode verspricht eine hohe Homogenität der Versuchstiere bezüglich ihrer Antworten auf die DNA-Schädigung und erfüllt damit eine der fundamentalen Anforderungen bei der Suche nach reproduzierbaren Ergebnissen. Die Nachteile dieser Methode liegen in der Problematik, nicht nur für die jeweilige Krebserkrankung und Einflussfaktoren, sondern auch für die karzinogene Größe zugeschnittene genetische DNA-Veränderungen zu finden und sie bei Versuchstieren einheitlich zu etablieren. Unter dieser Prämisse müssen die bisherigen Tierstudien gesehen werden. Die wichtigsten sind im Folgenden kurz zusammengefasst.

6.3.1 Spontanes Tumorwachstum

La Regina et al. (2003) untersuchen den Effekt von 835 MHz Mikrowellen mit FDMA-Modulation und von 847 MHz Mikrowellen mit CDMA Modulation auf die Inzidenz von spontan gebildeten Tumoren in F344 Ratten. Je 80 männliche und weibliche Tiere werden zufällig in drei Gruppen eingeteilt. Eine der Gruppen dient als Kontrolle, die restlichen zwei Gruppen werden mit Mobilfunkfeldern einer Leistung von 1,5 W, was einer SAR von 1,3 W/kg entspricht, exponiert. Die Tiere werden 4 Stunden pro Tag, 5 Tage pro Woche über 2 Jahre lang dem Feld ausgesetzt. Nach dem Abschluss der Exposition werden bei allen Tieren das Körpergewicht, die Überlebensdauer, die Anzahl und Typ der Tumoren und die

Inzidenz der Hyperplasie in allen wichtigen Organen (z.B. im Gehirn, Leber, Nieren, Herz) ermittelt. Die statistische Analyse hat keine signifikanten Differenzen zwischen schein- und exponierten Tieren in den bewerteten Kennwerten ergeben.

Utteridge et al. (2002) exponieren je 120 transgene E μ -Pim1- und 120 Wildtypen-Mäuse (jeweils weiblich, Alter 4 - 6 Wochen) mit GSM-Mobilfunkfeldern bei einer Frequenz von 898,4 MHz und alternativen SAR von 0,25 / 1,0 / 2 und 4 W/kg 1h pro Tag, 5 Tage pro Woche, 104 Wochen lang. Als negative Kontrollen dienen 120 transgene E μ -Pim1- und 120 Wildtypen-Mäuse. Alle Tiere werden während der Exposition und Scheinexposition in Käfigen gehalten. Insgesamt werden 960 Tiere exponiert, 240 Mäuse stehen als Kontrollen zur Verfügung. Zur Bewertung des Feldeinflusses werden die Überlebenszeiten, das Gewicht, Daten histopathologischer Untersuchungen von einer Reihe von Organen sowie Tumorinzidenzen herangezogen. Der statistische Vergleich aller Daten zwischen den scheinexponierten Tieren und den mit unterschiedlichen SAR exponierten Mäuse ergibt keine signifikanten Differenzen. Diese Studie bestätigt damit nicht die Ergebnisse der Untersuchung von Repacholi et al. (1997), die ein ähnliches Design, aber wesentlich kleinere Versuchsgruppen aufwies.

Takahashi et al. (2002) setzen 199 fünf Wochen alte männliche C57BL/6 Mäuse mit einem genetischen Defekt zur Untersuchung des Einflusses von 1,5 GHz Mikrowellen auf die Induktion von Mutationen ein. 59 Tiere werden bei einer SAR von 2 W/kg, 85 Tiere bei 0,67 W/kg und 55 Mäuse ohne Feld 90 Min. pro Tag, 5 Tage pro Woche, 4 Wochen lang in einem Kunststoffkäfig gehalten. Zur Beurteilung eines eventuellen Einflusses werden histopathologische und immunohistochemische Untersuchungen des Gehirns vorgenommen. Statistische Vergleiche der Daten von exponierten und scheinexponierten Tieren zeigen keine signifikante Unterschiede in Gliose, degenerativen Läsionen, KI-67 Markierungen, apoptotischen Indizes der Gliazellen, Häufigkeit unabhängiger Mutationen der lac1 Transgene und in Deletions-Mutationen.

Die Exposition mit Mikrowellen lässt keine erhöhte Gefahr der Bildung von Hirntumoren erkennen.

Zu negativen Ergebnissen bezüglich einer Wirkung von Mikrowellen kommen **Frey et al. (1998)**, die eine spontane Tumorinzidenz des Brusttumors bei 100 C3H/HeJ-Mäusen überprüfen. Dabei werden 2,45 GHz-Felder (CW) mit einer Ganzkörper-SAR von 0,3 W/kg in einer 18-monatigen Exposition (20 Std./Tag, 7 Tage/Woche) appliziert. Nach der Exposition erfolgt eine histopathologische Untersuchung. Der statistische Vergleich zeigt keinen signifikanten Unterschied in der Inzidenz (Scheinexposition: 52 %, Exposition: 44 %), der Latenz des Tumorbeginns (Scheinexposition: 62,3 Wochen, Exposition: 64 Wochen) und der Wachstumsrate des Brusttumors.

201 transgene weibliche Mäuse vom Typ E μ -Pim1, die zur Entwicklung von Lymphom-Tumoren neigen, kommen in Untersuchungen zur Einwirkung von Mikrowellen auf das Tumorstadium von **Repacholi et al. (1997)** zum Einsatz. Als Kontrolle dienen 100 Tiere, die restlichen Mäuse werden 2 mal je 30 Min./Tag 8 Monate lang mit einer planaren GSM-900 MHz-Welle exponiert. Dabei können sich die Tiere frei bewegen. Unter Fernfeld-Bedingungen liegt die Leistungsdichte zwischen 2,6 und 13 W/m², was zu SAR-Spitzenwerten zwischen 1,008 und 4,2 W/kg bzw. Ganzkörper-Mittelwerten zwischen 0,13 und 1,4 W/kg führt. Die Ergebnisse zeigen eine 2,4-fache Erhöhung der Inzidenz von Lymphoma-Tumoren bei feldexponierten Tieren. Ob und inwieweit diese Ergebnisse auf den Menschen übertragbar sind, wo derartige Genmutationen nicht vorkommen, muss in weiteren Studien überprüft werden.

Toler et al. (1997) führen Untersuchungen zur spontanen Tumorinzidenz bei 400 C3H/HeJ-Mäusen durch, die eine Anlage zur Brustkrebsentwicklung aufweisen. Weitere 200 Tiere erfahren eine Scheinexposition. Zur Exposition von insgesamt 200 Tieren werden horizontal polarisierte 435 MHz gepulste Mikrowellen (1 μ s Pulsdauer, 1000 Pulse/s) mit einer Leistungsdichte von 1 mW/cm² angewandt. In der 21-monatigen

Exposition (22 Std./Tag, 7 Tage/Woche) beträgt die kalorimetrisch ermittelte Ganzkörper-SAR 0,32 W/kg. Nach 21 Monaten erfolgt bei allen Tieren eine histopathologische Untersuchung des Gewebes. Zur statistischen Bewertung werden die Inzidenzen und die Anzahl der gefundenen nicht- und neoplastischen Läsionen pro Fundstelle und Tier herangezogen. Die Überlebenswahrscheinlichkeit wird mit Hilfe der Kaplan-Meier-Methode ermittelt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen keine Unterschiede im Hinblick auf die Latenz der Tumorentstehung, die Tumorwachstumsrate sowie die gesamten Tumorinzidenz. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Überlebens ist in beiden Gruppen vergleichbar, die histopathologischen Überprüfungen ergeben keine auffälligen Unterschiede zwischen den Kontroll- und den Feldgruppen.

Chou et al. (1992) führen Untersuchungen zur spontanen Tumorinzidenz an je 100 männlichen Sprague-Dawley-Ratten in Feld- und Kontrollversuchen durch. Die Feldexposition erfolgt im 2,45 GHz-Feld mit Pulsmodulation (Pulsdauer 10 μ s, 800 Pulse/s) in einem zirkulär polarisierten Wellenleiter. Die Expositionsdauer beträgt bis zu 25 Monate und 21,5 Std. täglich. Die kalorimetrisch ermittelte Ganzkörper-SAR liegt zwischen 0,15 und 0,4 W/kg. Nach 25 Monaten oder aber nach dem Tod der Tiere wird die Häufigkeit der neoplastischen Läsionen (gutartig, bösartig) pro Tier und Organ histopathologisch bestimmt. Nach einem Alter von 18 Monaten steigt die Häufigkeit der Läsionen in beiden Gruppen stark an, wobei die höchste Inzidenz im endokrinen System zu beobachten ist. Obwohl einzelne Vergleiche zwischen den Inzidenzen in Kontroll- und exponierten Tieren keine statistische Signifikanz zeigen, ist die Summeninzidenz der primären bösartigen Tumoren in exponierten Tieren wesentlich höher. Dieses irreführende Ergebnis wird von den Autoren auf die niedrige Anzahl der Tiere, gemessen an der Anzahl der bewerteten Läsionsarten, zurückgeführt.

6.3.2 Chemisch oder durch Strahlen initiierte Tumoren

Die meisten Untersuchungen zum Nachweis einer Krebspromotion durch Mikrowellen werden an Tieren durchgeführt, bei denen das Tumorgeschehen chemisch oder über Strahlung eingeleitet wird.

Heikkinen et al. (2003) prüfen eine promovierende Wirkung von zwei unterschiedlichen digitalen Mobilfunkfeldern (DAMPS und GSM) auf die mit ultravioletten Licht (UV) induzierten Hauttumoren bei transgenen und nicht-transgenen Mäusen. 20 Tiere dienen als Käfigkontrolle, drei weitere Gruppen mit 45 bis 49 Tieren werden 52 Wochen lang mit UV-Licht bei 240 J/m² bestrahlt. Danach werden zwei Gruppen mit DAMPS- und GSM- Mobilfunkfeldern bei SAR von 0,5 W/kg, 1,5 Stunden pro Tag, 5 Tage pro Woche, insgesamt 52 Wochen lang ausgesetzt. Bei allen Mäusen wird eine histopathologische Analyse aller Hautläsionen und spezifischer dorsaler Hautbezirke vorgenommen. Die UV-Bestrahlung führt in 11,6 % der nicht-transgenen Tiere und in 36,8 % der transgenen Mäuse zu makroskopischen Hauttumoren. Die statistische Analyse ergibt keine signifikante Differenz in den bewerteten Charakteristika zwischen Tieren, die nur UV-Bestrahlung erfahren haben und Mäusen, die zusätzlich mit Mobilfunkfeldern exponiert werden. Bei den mit Mikrowellen behandelten Tieren zeigt sich eine leichte Beschleunigung des Wachstums von Hauttumoren bei nicht-transgenen Mäusen.

Bartsch et al. (2002) berichten über Ergebnisse drei aufeinander folgende Studien mit Ratten zur Promotion von chemisch induzierten Brusttumoren unter der Wirkung von GSM-Mikrowellen. Je 120 weibliche Sprague-Dawley Ratten im Alter von 38 Tagen (Studie I), 43 Tagen (Studie II) und 34 Tagen (Studie III) werden herangezogen. Je 12 Tiere pro Käfig werden unter standardisierten Bedingungen gehalten, wobei je 60 Tiere (5 Käfige) exponiert oder scheinexponiert werden. Die eigentliche Untersuchung beginnt am 51sten Lebenstag mit der Injektion von 5 mg pro 100 mg Körpergewicht DMBA zur Initiierung des

Brustkrebswachstums. Feldgruppen wurden GSM-900 MHz Mikrowellen mit einer Leistungsdichte von $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ und SAR zwischen 17,5 und $70 \text{ mW}/\text{kg}$ über die gesamte Untersuchungsdauer ausgesetzt. Die Untersuchung wird bei jedem Tier beendet, wenn ein Tumor die Größe zwischen 1 und 2 cm erreicht. Danach erfolgt eine histopathologische Untersuchung der Tumore, woraus die Zuordnung zu gut- und bösartigen Tumoren vorgenommen wird. Die statistische Analyse der Daten ergibt nur für Experiment I eine signifikante Verlängerung der mittleren Latenzzeit für exponierte Tiere von 145 bei Kontrollen auf 278 Tage. Die Gesamtbewertung der Tumor-Latenz und der kumulativen Tumorinzidenz der drei Experimente liefert dagegen ein $\text{OR}=1,08$ (95%, KI 0,91 - 1,29) bzw. $\text{OR}=0,96$ (95%, KI 0,85 - 1,07). Die Ergebnisse stützen nicht einen kanzerogenen oder einen krebspromovierenden Effekt der Mobilfunkfelder.

Heikkinen et al. (2001) untersuchen die Promotionswirkung von analogen und digitalen Mobilfunkfeldern auf Tumoren, die mit Röntgenstrahlen initiiert werden. 200 weibliche CBA/S-Mäuse im Alter zwischen 3 und 5 Wochen werden in 4 zufällige Gruppen eingeteilt. Eine Gruppe dient als Kontrolle. Drei Gruppen werden am Anfang Röntgen-Strahlen mit einer Dosis von 4 Gy bestrahlt und danach je Gruppe mit NMT-Feld (analog), Frequenz 902,5 MHz, SAR $1,5 \text{ W}/\text{kg}$ oder mit GSM-Feld, Frequenz 902,4 MHz, SAR $0,35 \text{ W}/\text{kg}$ täglich 1,5 h, 5 Tage pro Woche insgesamt 78 Wochen lang exponiert. Zur Bewertung werden das Körpergewicht sowie hämatologische und histopathologische Daten herangezogen. Die statistische Analyse liefert keinen signifikanten Unterschied in der Inzidenz der neoplastischen Läsionen bei den mit Mobilfunkfeldern exponierten und scheinexponierten Tieren. Die Studie zeigt keine Evidenz für eine promovierende Wirkung der analogen NMT- und der digitalen GSM-Felder.

Adey et al. (2000) untersuchen im Tiermodell die Einflussnahme eines frequenzmodulierten 836 MHz-Fernfeldes auf die Promotion von Tumoren im Zentralnervensystem. Die SAR im Gehirn beträgt $1 \text{ W}/\text{kg}$ bei weiblichen und $1,2 \text{ W}/\text{kg}$ bei männlichen Tieren. In der 2-jährigen

Untersuchung werden Fischer-344-Ratten eingesetzt. Die Exposition der Tiere erfolgt vom 19. Tag der Trächtigkeit an und wird fortgesetzt, bis die Nachkömmlinge 21 Tage alt sind. Verfolgt wird die spontane Karzinogenität wie auch die Inzidenz der Hirntumoren nach der Initiierung durch das neurokarzinogene Ethylnitrosourea (ENU) mit einer Dosis von $4 \text{ mg}/\text{kg}$ Körpermasse. 102 trüchtige Ratten werden im ersten Schritt zufällig in 6 Gruppen unterteilt. Ihre 540 Nachkommen werden als Kohorten mit verschiedenen Kombinationen aus Kontrollen, Feldexposition und ENU-Applikationen eingruppiert. Von den 540 Jungratten sterben 168 vor dem Ablauf der Untersuchung. Das Überleben der Tiere steht in keiner Relation zur Haltung, Exposition oder ENU-Vorbehandlung. Die spontane Tumorinzidenz liegt zwischen 1,1 und 4,4 % in den Kontrollgruppen und zwischen 14,4 und 22,2 % bei den ENU-behandelten Ratten. Die Feldexposition steht in keiner Beziehung zu der Inzidenz der spontan gebildeten oder mit ENU eingeleiteten Tumoren sowie ihrem histologischen Typ.

Adey et al. (1999) beobachten die Häufigkeit spontaner und chemisch induzierter ZNS-Tumoren in Fischer-344-Ratten bei der Applikation von 836 MHz-Feldern mit NADC-Pulsmodulation (Pulsbreite $6,7 \mu\text{s}$, 50 Pulse/s). In der Befeldung werden Fern- und Nahfeldbedingungen simuliert. Die Ganzkörper-SAR des Nahfeldes liegt je nach Gewicht der Tiere zwischen $0,27$ und $0,72 \text{ W}/\text{kg}$, wobei im Gehirn eine SAR zwischen $0,74$ und $1,6 \text{ W}/\text{kg}$ geschätzt wird. Eine kalorimetrische Überprüfung am Kadaver hat für das Gehirn eine SAR von 1,8-2,3 W/kg ergeben.

In einigen Tieren sind ZNS-Tumoren zu Beginn der Experimente mit Ethylnitrosourea (ENU) initiiert. 36 seit 15 Tagen trüchtige Tiere werden in 4 Gruppen eingeteilt, die in 2 Phasen nach dem Schema Kontrolle/Kontrolle, Kontrolle/Feld, ENU/Kontrolle und ENU/Feld behandelt werden. Zwischen dem 19. und 23. Tag der Trächtigkeit beginnt die Exposition mit dem Fernfeld. Ab dem 35. Tag (2 Std./Tag, 4 Tage/Woche, 22 Monate) werden die trüchtigen Ratten und ihre Würfe (insgesamt 236 Ratten) mit dem Nahfeld expo-

niert. 182 Tiere überleben die Experimente, die gestorbenen 54 Ratten werden als eine separate Gruppe bewertet. In der Autopsie und einer histologischen Untersuchung werden die ZNS-Tumoren klassifiziert. Der statistische Vergleich der Ergebnisse beider Gruppen (früher gestorbene und überlebende Ratten) zeigt, dass die Befeldung keine krebspromovierende, sondern vielmehr eine tumorhemmende Wirkung aufweist. Diese "positive" Wirkung wird von den Autoren auf die statistische Unzulänglichkeit bei sehr kleinen homogenen Gruppen zurückgeführt.

Chagnaud et al. (1999) führen vergleichende Untersuchungen der Einwirkung von GSM-900-MHz-Mikrowellen an weiblichen Sprague-Dawley-Ratten durch, bei denen chemisch Sarkom-Tumore induziert wurden. Insgesamt werden 124 weibliche, 50-60 Tage alte Ratten mit einem Gewicht zwischen 180 g und 200 g herangezogen und in 14 Gruppen mit je 6-9 Tieren eingeteilt. Eine Gruppe mit 6 Tieren dient als Kontrolle. Die Tumorentstehung wird chemisch mit Benzo(a)pyren (BP) eingeleitet. Zusätzlich werden alle Tiere bis auf eine Kontrollgruppe 20, 40 und 75 Tage nach der BP-Injektion 2 Std. täglich, 2 Wochen lang mit Mikrowellen exponiert. Eine Hornantenne baut in den 65 cm entfernten Käfigen eine Leistungsdichte von 55 oder 200 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ auf, was bei den Tieren zu einer Ganzkörper-SAR zwischen 75 und 270 mW/kg führt. Zur Beurteilung der malignen Transformation werden der Pegel der Autoantikörper des Anti-Phosphatidylinositols sowie die Erscheinungsbilder der Tumoren aufgenommen. Im Vergleich zwischen exponierten und scheinexponierten Tieren ergibt sich kein statistischer Unterschied im Pegel der Autoantikörper der Tumorentstehung und der Überlebensdauer der Tiere. In der Reihe der Studien mit transplantierten Tumorzellen werden ähnliche Resultate berichtet.

Higashikobo et al. (1999) präsentieren Untersuchungen über die Einwirkung von Mikrowellen auf das Tumorstadium von Fischer-344-Ratten, bei denen 9L-Gliosarkoma-Zellen im Gehirn initiiert wurden. Insgesamt werden 293 35 g - 70 g schwere Tiere, davon 101 in Kontrollexperimenten, herangezogen. Bei der Befel-

dung kommen alternativ 835,62 MHz-frequenzmodulierte Felder oder CDMA-modulierte 847,74 MHz-Mikrowellen zum Einsatz. Bei beiden Feldarten beträgt die Ganzkörper-SAR $0,75 \pm 0,25 \text{ W}/\text{kg}$. Die Feld-Tiere werden 4 Std./Tag, 4 Tage/Woche, 4 Wochen vor und 150 Tage nach der Tumorentstehung exponiert. Während der Studie werden die Ratten neurologisch und anschließend das Gehirn auf Gliosarkom-Tumore histopathologisch untersucht. In der statistischen Bewertung zeigt sich in den Tumor-Charakteristika sowie in der Überlebensrate kein Unterschied zwischen den exponierten und den nichtexponierten Tieren.

Imaida et al. (1998b) applizieren 1,44 GHz-Mikrowellen als Nahfeld mit einer Pulsmodulation (Pulsbreite 6,7 μs , 50 Pulse/s) auf 6 Wochen alte männliche Fischer-344-Ratten mit induziertem Lebertumor und lassen sie 6 Wochen lang einwirken. Die Ganzkörper-SAR beträgt dabei 0,4 - 0,7 W/kg. Die Tumorentstehung erfolgt chemisch mit Diethylnitrosamin (DEN) in 48 Tieren, je 24 dienen als Kontrolle oder werden zusätzlich mit Mikrowellen befeldet. Zur Beurteilung des Potentials der Karzinogenese wird die Anzahl der positiven Foci in der Leber der Tiere gezählt und verglichen. Ein statistischer Vergleich zwischen den exponierten und nichtexponierten Tieren zeigt keinen signifikanten Effekt der Mikrowellen.

Auch eine weitere Untersuchung von **Imaida et al. (1998a)** wird am gleichen Krebspromotionsmodell (männliche Fischer-344-Ratten mit DEN-Vorbehandlung) durchgeführt (929,2 MHz-Nahfeld mit japanischer TDMA-Modulation, 50 Pulse/Sek., Tastverhältnis 33 %). Die zeitlich gemittelte maximale SAR liegt bei 6,6-7,2 W/kg, wohingegen in der Leber nur Werte zwischen 1,7 und 2 W/kg erreicht werden. Die Ganzkörper-SAR wird im Mittelwert mit 0,58-0,8 W/kg angegeben. Nach der Untersuchung wird bei den Tieren eine histopathologische Analyse von Proben aus Leber, Milz, Thymusdrüse und Nebennieren vorgenommen. Nur in der Leber werden Veränderungen beobachtet. Der statistische Vergleich ergibt keine Differenz zwischen DEN-vorbehandelten und feldexponierten Tieren.

Wu et al. (1994) lassen 2,45 GHz-CW-Mikrowellen mit einer Leistungsdichte von 10 mW/cm² und einer Ganzkörper-SAR zwischen 10 und 12 W/kg 5 Monate lang auf 4-5 Wochen alte BALB/c-Mäuse (je 50 % männlich und weiblich) einwirken. 115 Tiere werden in 4 etwa gleich große Gruppen aufgeteilt. Eine Gruppe (A) dient als Kontrolle, die zweite Gruppe (B) wird mit Dimethylhydrazin (DMH) behandelt, das in Mäusen nachweislich große Darmtumoren initiiert. Die dritte Gruppe (C) wird mit DMH und zusätzlich mit Mikrowellen exponiert. In der 4. Gruppe (D) erfahren die Tiere neben DMH auch eine Behandlung mit 12-O-Tetradecanoylphorbol-13-Azetat (TPA), das als starker Tumorpromotor gilt. Die Inzidenz der Darmtumoren ist in den Gruppen B, C, und D nicht statistisch signifikant unterschiedlich. In Gruppe D ist die Anzahl und die Größe der Tumoren wesentlich höher als in den Gruppen B und C. Keine statistisch signifikanten Differenzen sind zwischen den Gruppen B und C zu finden. Die Resultate lassen keine Wirkung der Mikrowellen auf die Tumorprogression erkennen.

Salford et al. (1993) führen Untersuchungen über die Einflüsse von Mikrowellen auf Fischer-344-Ratten durch, bei denen RG2-Glioma-Tumorzellen initiiert werden. Gruppen mit 4-11 Tieren werden in einer TEM-Zelle einem 915 MHz-Feld mit kontinuierlicher Welle oder gepulst (7 Std./Tag, 5 Tage/Woche) bis zu 3 Wochen lang ausgesetzt oder scheinexponiert. Die kontinuierliche Welle mit einer Spitzenleistung von 1 W produziert in den 150 g-200 g schweren Ratten eine Ganzkörper-SAR von 1,67 W/kg. Die Kennwerte der pulsmodulierten 2 W-Welle variieren in der Modulationsfrequenz (4, 8, 16, 50, 217 Hz), der Pulslänge (0,57 und 6 ms) und in der Ganzkörper-SAR (0,0077 bis 1 W/kg). Die Tumorentwicklung im Gehirn wird histopathologisch/mikroskopisch untersucht. Aus den Ergebnissen lässt sich kein statistisch begründeter Einfluss der Mikrowellen auf das Tumorstadium ableiten.

6.4 In vitro-Experimente

Die in vitro-Untersuchungen stellen eine Reihe von Methoden zur Verfügung, die einen detaillierten Einblick in die Zellfunktionen von den globalen Vorgängen der Zellreifung und -teilung bis hin zu einzelnen genetischen Ereignissen anbieten. Bei Erkrankungen wie Krebs, die ihren Beginn in der DNA-Schädigung nehmen, spielen diese Methoden eine wichtige Rolle in der Forschung. Dabei werden je nach Fragestellung folgende pathologische Veränderungen bzw. Schäden vorrangig verfolgt:

- Beschleunigung des Zellzyklus und der Proliferation
- Chromosomenaberrationen und Induktion von Mikrokernen (Mikronuklei)
- DNA-Strangbrüche
- Genmutationen und -expressionen.

Die Kenngrößen des Zellzyklus und der Proliferation beschreiben die Funktion der Zelle auf einem hohen Integrationsgrad und können damit belegen, ob sich in einer Summe von vielen, zum Teil gegenläufigen Faktoren, eine Einflussgröße durchsetzt. Die mögliche Beeinflussung der Proliferation von Tumorzellen durch Mikrowellen wird zytogenetisch wie auch mittels des Proliferations-(Tumor-)Markers ODC (Ornithin-decarboxylase) untersucht.

Chromosomenaberrationen und Bildung von Mikrokernen sind Schäden, die eine besondere Beachtung finden müssen, da sie bei der Zellteilung weitergegeben werden.

Chromosomen und ihre Untereinheiten Chromatide bestehen aus strukturellen Einheiten, deren Berührungstellen eine erhöhte Restitutionsneigung zeigen. Die in dieser Interphase durch spontane oder auch durch äußere Einflüsse häufig auftretenden Brüche führen zu unterschiedlichen Schäden der DNA. Im Prinzip wird unterschieden zwischen

- Defizienten bzw. Deletionen durch den Verlust von Chromosomenregionen
- Duplikationen
- Translationen und Inversionen durch den Umbau von DNA-Einheiten.

Derartige Schäden werden ebenfalls im Zusammenhang mit der Einwirkung von ionisierenden elektromagnetischen Feldern aufgezeigt und mit dem Krebsgeschehen positiv korreliert.

Die DNA-Strangbrüche sind empfindliche und frühe Zeichen für eine Schädigung der Erbinformation im Zellkern, die zur Entstehung einer Krebserkrankung führen können. Aber nicht nur genotoxische Noxen können Strangbrüche in der DNA erzeugen, sondern sie entstehen vermehrt auch bei notwendigen Schritten einer Untersuchung wie z.B. bei Tötung der Tiere oder Präparation der Zellen. Wegen der methodischen Probleme der zur Verfügung stehenden Verfahren ist eine vorsichtige Interpretation eventueller Befunde und eine Überprüfung auf einer höheren Ebene ratsam.

Genmutationen spielen nachweislich eine Schlüsselrolle in der initialen Phase der Tumorentstehung. Die entstandenen Schäden können zur Beeinflussung der Genregulation und schließlich zu explosiven Proliferationen der Zelle führen. Es wird angenommen, dass das Krebswachstum in spezifischen Genen wie z. B. Proto-Onkogenen oder Tumor-Suppressor-Genen induziert wird, die ohne Schädigung einen lebenswichtigen Bestandteil des Genoms bilden.

Die Proto- oder zellulären Onkogene, die sich in einer gesunden Zelle offenbar als

- Wachstumsfaktoren
- Wachstumsfaktor-Rezeptoren und
- Signal-Transduktoren

an der Steuerung von Zellwachstum und Differenzierung beteiligen, sind zufällig über das Genom verteilt und nicht zu Clustern angeordnet. Die Proto-Onkogene können durch Punktmutation und Verlagerung in die Nachbarschaft eines Promotors, z. B. in Verbindung mit einer Translokation oder einer Amplifikation, zu Onkogenen werden. Die aktivierten Proto-Onkogene sind im Stande, eine normale Zelle zur Tumorzelle zu transformieren. Die Anti-Onkogene oder Tumor-Suppressor-Gene verringern dagegen das Zellwachstum und unterdrücken in der gesunden Zelle die Entstehung von Tumoren. Ihre Funktion ist die

- Beeinflussung der Zelldifferenzierung
- Kontrolle des Zell-Zell-Kontaktes
- Inhibition der Wachstumsfaktoren
- Regulation der Transkription
- Interaktion mit Onkogenen.

Ihr Funktionsverlust oder ihre Inaktivierung führt zu unkontrollierten Zellteilungen, dadurch werden sie zu den wichtigsten krebsauslösenden Faktoren. Bisherige molekularbiologische Studien haben mindestens 11 Tumor-Suppressor-Gene aufgezeigt.

Im menschlichen Genom wurden bisher mehr als 70 verschiedene Proto-Onkogene erkannt, wobei in vielen Arbeiten dem c-myc-Onkogen eine besondere Bedeutung beigemessen wird. Eine Erhöhung von c-myc in der mRNA wird als Indikator für eine Tumorpromotion angesehen. Die Transkription der so genannten "Early-Response-Gene", wie der c-jun und c-fos, gelten als eine weitere potentielle Einflusstelle der exogenen Faktoren.

Die Krebsentstehung wird aber als ein mehrstufiger Prozess angesehen, für dessen Auslösung die Aktivierung eines einzigen Proto-Onkogens bzw. die Aktivierung eines Tumor-Suppressions-Gens nicht ausreichend ist. Man nimmt an, dass mehrere Mutationen an verschiedenen Stellen des Genoms erforderlich sind, damit das Krebsgeschehen eingeleitet wird.

Unter Genexpression wird eine selektive Aktivierung einzelner Gene aus dem sonst einheitlichen Gen-Satz in allen Chromosomen der somatischen Körperzellen verstanden. In den nachfolgenden Schritten der Transkription und Translation werden an Hand der in Genen enthaltenen Information besondere Einflüsse und strukturelle Proteine gebildet. Bei der Transkription erfolgt die Synthese von RNA, wobei in der Translation unter der Kontrolle der RNA bestimmte Proteine gebildet werden. Die produzierten Enzyme und Proteine sind u. a. für die Regulation des Zellwachstums mit verantwortlich.

Verschiedene Gene können auch durch starke exogene Einflüsse wie z.B. mitogene Chemika-

lien oder auch durch Stress oder intensive Wahrnehmung aktiviert werden. Diese Eigenschaft wird z.B. den früh erkennenden Genen wie c-fos oder c-jun zugeschrieben.

Die Expression anderer Gene wie z.B. c-myc oder c-ras kann nachweislich durch ultraviolette Strahlen oder Röntgenstrahlen erhöht werden. Es wird allgemein angenommen, dass diese Gene eine zentrale Rolle bei der Regulation der Gentranskription spielen.

6.4.1 Zytogenetische Studien

Higashikubo et al. (2001) prüfen in in vitro-Untersuchungen die Zellzyklus-Progression von Maus-Fibroblasten und humanen Glioblastom-Zellen unter Einwirkung von frequenzmodulierten (FMCW) 835 MHz-Mikrowellen und CDMA-modulierten 847 MHz-Mikrowellen. Die SAR beträgt 0,6 W/kg, das Feld wirkt 100 Stunden ein. Kontrollzellen werden ebenso lange ohne Exposition unter gleichen standardisierten Bedingungen gehalten.

Danach werden von allen Zellen fünf typische Zyklusparameter, die Transitzeiten in den Phasen G1, G2 und S und die Wahrscheinlichkeit der Zellteilung ermittelt. Der statistische Vergleich der Kennwerte zwischen Kontrollen und exponierten Zellen ergibt für beide Felder (FMCW oder CDMA) und SAR=0,6 W/kg keine signifikante Differenz.

GSM-modulierte 960 MHz-Felder werden von **Kwee et al. (1998)** zur Untersuchung der Einflussnahme von Mikrowellen auf die Proliferation der humanen Haut-Amnion-Zellen verwendet. Für die Befeldung der Kulturlösung in einer TEM-Zelle werden SAR-Werte von 0,021 / 0,21 und 2,1 mW/kg errechnet. Die Expositionszeit beträgt 20, 30 oder 40 Min. Die Proliferation der schein- und feldexponierten Tiere wird kalorimetrisch bestimmt. Die Proliferation der Zellen wird durch die Befeldung im Verhältnis zur Kontrolle gesenkt und variiert nicht nur mit der applizierten Leistungsdichte, sondern auch mit der

Dauer der Exposition. Ein maximaler Effekt wird mit der größten Leistungsdichte und der längsten Exposition erreicht.

Die der Ornithindecaboxylase (ODC) zugeschriebene enzymatische Wirkung bei der DNA-Synthese wird in mehreren Studien zur Überprüfung einer erhöhten Proliferation durch Mikrowellen eingesetzt.

Zu ähnlichen Ergebnissen gelangen **Stagg et al. (1997)** in Untersuchungen an Glia- und an C6-Glioma-Zellen von Ratten unter der Einwirkung eines 836 MHz-Feldes mit TDMA-Modulation. Bei der Applikation alternativer Leistungsdichten von 0,09 / 0,9 und 9 mW/cm² resultieren SAR-Werte zwischen 0,59 und 60 mW/kg. Die scheinexponierten und exponierten Proben befinden sich in TEM-Zellen innerhalb eines Inkubators bei 37 °C und 5%-iger CO₂-Schutzatmosphäre. Für die Bewertung verschiedener Phasen der DNA-Synthese nach der 24-stündigen Exposition wird die Zahl der Zellen pro Probe ausgezählt. Die Resultate zeigen in keiner Phase für die primären Glia-Zellen der Ratten statistisch signifikante Unterschiede. C6-Glioma-Zellen, befeldet mit 0,9 mW/cm² (SAR 5,9 mW/kg), weisen einen kleinen signifikanten Anstieg der DNA-Synthese auf. Andere Kenngrößen der befeldeten Proben bleiben unverändert gegenüber den Kontrollproben. Die Autoren stellen fest, dass die verwendeten TDMA-Felder weder die Proliferation der ursprünglichen Glia-Zellen noch die der transformierten C6-Zellen beeinflussen.

Penafiel et al. (1997) präsentieren Untersuchungen der ODC-Aktivität am gleichen Substrat (Fibroblasten der L929-Mäuse) unter 2- oder 24-stündiger Einwirkung von 835 MHz-amplitudenmodulierten Feldern (Modulationsfrequenz 0, 6, 16, 55, 60, 65 und 600 Hz oder mit AMPS-Modulation) mit einer mittleren SAR von 2,5 W/kg. Jeweils 5 ml Kulturlösung befinden sich in Behältern von 25 cm². Behälter der Kontroll- und Feldproben werden in 95 % Luft, 5 % CO₂-Schutzatmosphäre bei 37 °C gehalten. Die ODC-Aktivität einzelner Proben wird szintigraphisch bestimmt. Nur CW-835-MHz-Mikrowellen verursachen nach einer 6-stündigen Ex-

position eine geringe, aber signifikante Erhöhung der ODC-Aktivität.

Litovitz et al. (1993) beobachten die ODC bei Fibroblasten der L929-Mäuse unter der Einwirkung von 915 MHz-Feldern. Die Mikrowelle ist alternativ mit 55, 60 oder 65 Hz amplitudenmoduliert. Die kalorimetrisch ermittelte SAR beträgt 2,5 W/kg. Zellkulturen werden in einem Inkubator in 5% CO₂-Atmosphäre bei 37 °C gehalten und alternativ 8 Std. exponiert oder scheinexponiert. Die ODC-Aktivität in den Proben wird vor und nach der Exposition szintigraphisch bestimmt. Das Verhältnis der ODC-Aktivität zwischen Feld- und Kontrollproben wird statistisch bewertet. Die 8-stündige Exposition der Fibroblasten mit 915 MHz führt zur Verdopplung der ODC-Aktivität.

6.4.2 Chromosomenaberrationen und Induktion von Mikrokernen

Koyama et al. (2003) bestimmen in in vitro-Untersuchungen die Frequenz der Formation von Mikronuklei (FFM) induziert beim chromosomalen Bruch oder bei der Inhibition von Spindeln während der Zellteilung der Hodenzellen von Hamstern unter fünf folgenden Bedingungen:

1. Exposition mit einer kontinuierlichen Mikrowelle (CW) von 2450 MHz und alternativen SAR von 13, 39 und 50 W/kg, 188 Stunden lang,
2. wie Punkt 1. aber SAR 78 oder 100 W/kg,
3. Zellen werden mit einem Zellgift (Bleomycin) allein behandelt oder zusätzlich 18 Stunden lang den Mikrowellen nach Punkt 1. mit SAR 25, 78 und 100 W/kg ausgesetzt,
4. Zellen werden bei einer erhöhten Temperatur von 39 °C inkubiert,
5. Zellen werden bei der typischen Temperatur in der Studie von 37 °C gehalten, ohne dass eine andere Behandlung folgt.

Der statistische Vergleich der Daten aus den Experimenten 1 und 5 ergibt keine signifikanten Differenzen. Aus dem Experiment 2 resultiert

eine signifikante Erhöhung der FFM in Zellen am Rande und in der Mitte der Schale. Ebenfalls im Experiment 3 ergibt sich allgemein eine signifikante Erhöhung der FFM, wobei der Effekt noch deutlicher ausfällt, wenn das Feld und Bleomycin appliziert werden. Ein Temperaturanstieg in Experiment 4 verursacht ebenfalls eine signifikante Erhöhung der FFM. Die beobachtete Veränderung der FFM lässt sich mit der Wärmewirkung der Mikrowellen oder mit der Applikation von Zytostatika erklären.

Mashevich et al. (2003) untersuchen in vitro die chromosomale Instabilität der peripheren humanen Blutlymphozyten in 830 MHz-Mikrowellen bei einer 72-stündigen Exposition. Die erreichten SAR-Werte betragen 1,6 oder 8,8 W/kg. Die schein- und exponierten Proben werden bei einer Temperatur zwischen 34 und 37,5 °C gehalten. Die chromosomale Instabilität wird zytogenetisch gemessen. Die Ergebnisse zeigen einen linearen Anstieg der Aneuploidien im Chromosom 17 mit ansteigender SAR. Dieser genotoxische Effekt, der allgemein als Risikofaktor beim Krebs gilt, kann nicht auf thermische Wirkung zurückgeführt werden und soll bei der Festlegung von Sicherheitsgrenzen berücksichtigt werden.

Bisht et al. (2002) prüfen in in vitro-Untersuchungen die Bildung von Mikronuklei in Fibroblasten embryonaler Mäuse unter dem Einfluss von unterschiedlich modulierten Mikrowellen. Zur Exposition werden alternativ FDMA modulierte 835 MHz-Felder mit SAR von 3,2 oder 5,1 W/kg oder CDMA modulierte 847 MHz – Felder mit SAR von 3,2 oder 4,8 W/kg verwendet. Die Expositionsdauer erstreckt sich alternativ über 3, 8, 16 oder 24 Stunden. Neben Kontrollen ohne Exposition wird zusätzlich eine positive Kontrolle von radioaktiv mit 0,1 bis 1,2 Gy behandelten Tieren geschaffen. Außer der positiven Kontrolle resultiert aus der statistischen Bewertung für keine Expositionsbedingungen ein signifikanter Unterschied zur Kontrolle in der Anzahl der gebildeten Mikronuklei. Die Untersuchung kann keinen genotoxischen Effekt der angewandten Mikrowellen belegen.

McNamee et al. (2002) verfolgen die Überprüfung von DNA-Schäden und Induktion von Mikronuklei in humanen Leukozyten nach einer Exposition mit 1900 MHz Mikrowellen ohne Modulation (CW). Die Exposition der Zellen mit SAR von 0 / 0,1 / 0,26 / 0,92 / 2,4 und 10 W/kg bei 37 °C dauert 2 Stunden. Als positive Kontrolle dienen Zellen, die radioaktiv mit 1,5 Gy bestrahlt sind. Die DNA-Schäden werden sofort nach dem jeweiligen 2stündigen Untersuchungszyklus mit der "alkaline comet assay"-Methode inspiziert. Die Formation von Mikronuklei erfolgt mit Hilfe eines Zytokinese-Blockers.

Die statistische Analyse und der Vergleich zwischen Kontrollen und exponierten Zellen liefern keinen signifikanten Unterschied, weder bei DNA-Schäden noch in der Formation von Mikronuklei. Das applizierte Feld hat keine messbare Wirkung auf humane Leukozyten in einer Kultur.

Vijayalaxmi et al. (2001) untersuchen den Einfluss von CDMA-modulierten Mikrowellen auf chromosomale Schäden und die Formation von Mikronuklei in humanen Lymphozyten *in vitro*. Die SAR-Werte des applizierten 847 MHz-Mobilfunkfeldes liegen bei einer Leistungsdichte von 950 W/m² (95 mW/cm²) um 4,9 oder 5,5 W/kg. Neben den 24 Stunden lang befeldeten Zellen und den Kontrollen ohne Exposition werden als positive Kontrolle Blutzellen radioaktiv mit 1,5 Gy bestrahlt. Danach werden die scheinexponierten oder bestrahlten Lymphozyten bei 37 °C 42 oder 72 Stunden in einer Kulturlösung gehalten. Genetische Schäden werden aus der Inzidenz der chromosomalen Aberrationen und der Anzahl der Mikronuklei bestimmt. Die Daten zeigen keine signifikante Differenzen zwischen exponierten Lymphozyten und der Kontrolle bezüglich der mitotischen Indizes, der Häufigkeit der Aberrationen, der Ausdehnung der Fragmente und der Mikronuklei. Dagegen weichen die Daten der radioaktiv behandelten Zellen signifikant von den Kontrollen ab, womit die Vitalität der Zellen bestätigt ist. Die Autoren können aus den Ergebnissen keine Evidenz für die Wirkung der applizierten Mobilfunkfelder auf die Induktion von chromosomalen Aberrationen und die Bildung von Mikronuklei ableiten.

d'Ambrosio et al. (2002) prüfen, ob in humanen Lymphozyten unter Einwirkung von Mikrowellen zytogenetische Schäden entstehen. Zur Exposition der Zellen werden Mikrowellen mit einer Frequenz von 1748 MHz, ohne Modulation oder mit einer Phasenmodulation (GSMK) herangezogen. Die Zellen werden 15 Min. lang mit einer maximalen SAR von 5 W/kg befeldet, parallel wird eine Kontrolle ohne Feld gehalten. Die statistische Bewertung der Ergebnisse zeigt keinen Unterschied in zytogenetischen Schäden in Mikrowellen ohne Modulation. Für die Exposition der humanen Lymphozyten mit GSMK-Mikrowellen resultiert dagegen eine statistisch signifikante Abweichung in der Mikrokern-Häufigkeit. Die Autoren leiten aus dem Ergebnis eine mögliche genotoxische Wirkung der GSMK-Felder ab.

Li et al. (2001) überprüfen den Einfluss von 847 MHz-Mobilfunkfelder mit der CDMA-Modulation und 835 MHz-Feldern mit FDMA-Modulation, beide Felder mit SAR zwischen 3,2 und 5,1 W/kg, auf DNA-Schädigung in Fibroblasten von Mäusen. Die Schein-Exposition und Exposition der Zellen mit Mikrowellen, bei einer Temperatur von 37 °C, dauert entweder 2, 4 oder 24 Stunden, wonach eine 4stündige Inkubation und nachfolgend die Kometenschweif-Bestimmung der DNA-Proben folgt. Die statistische Bewertung der exponierten und scheinexponierten Fibroblasten ergibt keine signifikante Unterschiede hinsichtlich des Kometen-Moments und der Kometenlänge. Eine DNA-Schädigung mit den angewandten Mikrowellen mit SAR bis zu 5,1 W/kg kann nicht festgestellt werden.

Sykes et al. (2001) untersuchen den Einfluss von 900 MHz-Mikrowellen mit der GSM-Modulation auf die intrachromosomale Rekombination in Milzgewebe von Mäusen. Es ist bekannt, dass derartige Schädigungen zu Mutationen führen, die den Anstoß für eine Reihe von Tumoren geben. Je 42 weibliche und männliche transgene Mäuse werden 30 Min. pro Tag, bis 5 Tagen in der Woche, 5 Wochen lang mit den Mobilfunkfeldern bei SAR von 4 W/kg exponiert. Eine gleich große Tiergruppe wird scheinexponiert gehalten. Drei Tage nach dem Abschluss der Exposition wird das Milzgewebe herausge-

nommen und histochemisch untersucht. Die Ergebnisse zeigen keine signifikante Differenz in der intrachromosomalen Rekombination des Milzgewebe zwischen Kontrollen und exponierten Tieren für 1 und 5 Tage dauernde Exposition mit Mikrowellen.

Die Formation von Mikronuklei, die auf eine Inversion zurückgeführt wird, untersuchen **Vijaya-laxmi et al. (1997)** an C3H/HeJ-Mäusen unter Einwirkung von Mikrowellen. Diese Tiere neigen zu einer erhöhten Entwicklung von Brustkrebs. Neben einer Kontrollgruppe und einer Gruppe für eine positive Kontrolle wird eine Gruppe von Mäusen mit kontinuierlichen Mikrowellen mit einer Frequenz von 2,45 GHz exponiert. Die Ganzkörper-SAR beträgt 1 W/kg in einer Exposition, die 20 Std. pro Tag, 7 Tage pro Woche und insgesamt 18 Monate lang andauert. In Experimenten werden 225 vier Wochen alte weibliche Mäuse untersucht. Je 100 Tiere werden zufällig einer scheinexponierten und einer exponierten Gruppe zugeteilt, 25 dienen als positive Kontrolle. Die Mäuse zur positiven Kontrolle werden mit dem chemischen Promotor Mitomycin C 24 Std. vor dem Abschluss der Untersuchung behandelt. Die Genotoxizität in Blut und Knochenmark wird zytologisch untersucht. Darüber hinaus werden die Tiere seziiert und histologisch überprüft.

Die statistische Bewertung zeigt eine signifikante Erhöhung der Inzidenz von Mikronuklei in positiven Kontrollen. Im Vergleich zwischen exponierten und scheinexponierten Tieren ergibt sich kein Unterschied der Inzidenz von Mikronuklei in jungen polychromatischen Erythrozyten des peripheren Blutes und des Knochenmarks.

Die Ergebnisse der Untersuchungen von Maes et al. (1995) werden in einer nachfolgenden Studie von **Maes et al. (1997)** unter Verwendung von 935 MHz-Mikrowellen ohne Modulation (CW) bestätigt. Humane Lymphozyten, behandelt mit mutagenem Mitomycin C, zeigen nach der Feldexposition eine erhöhte Häufigkeit des Schwesterchromatid-Austausches, wohingegen bei unbehandelten Zellen kein Effekt festzustellen ist. Die systematische Faktorisierung des Versuchsablaufes und die dabei gewonnenen Resultate lassen den Schluss zu, dass nur be-

schädigte Zellen einen Einfluss durch Mikrowellen erfahren. Dabei hat die Art der Modulation (CW oder GSM) keinen Einfluss auf das Ergebnis der Untersuchung. Für eine dosimetrische Betrachtung der Schwellenwerte der Feldstärken reichen die bisherigen Resultate allerdings nicht aus.

In einer früheren Untersuchung von **Maes et al. (1995)** werden humane Lymphozyten bei 17 °C gehalten, alternativ mit chemischen Mutagenen behandelt und zusätzlich 954 MHz-Mikrowellen mit einer GSM-Modulation ausgesetzt. Bei der jeweils zweistündigen Feldexposition beträgt die SAR 1,5 W/kg. Die Resultate zeigen keinen Einfluss der Mikrowellen auf die chemisch unbehandelten Zellen. Dagegen wird eine Erhöhung der Häufigkeit des Schwesterchromatid-Austausches in chemisch mutierten Lymphozyten nach der Feldexposition deutlich.

Maes et al. widmen sich der Frequenz des Schwesterchromatid-Austausches in drei unterschiedlichen in vivo-Untersuchungen mit humanen Lymphozyten.

Untersuchungen von chromosomalen Aberrationen in humanen Lymphozyten werden von Maes et al. (1993 und 1995) durchgeführt.

Maes et al. (1995) ziehen Blutproben von Arbeitern, die an GSM 954 MHz-Antennen arbeiten, sowie Blutproben von Probanden zur Untersuchung chromosomaler Aberrationen heran. 8 gesunde männliche und weibliche Spender im Alter zwischen 21 und 63 Jahren spenden Blut. Jeweils 10 ml heparisierte Blutproben werden bei einer Temperatur von 17 °C 2 Std. lang Feldern mit 49 V/m Feldstärke exponiert. Die SAR wird auf 1,5 W/kg geschätzt. In einer nachfolgenden Studie werden Blutproben von 6 gesunden Arbeitern, die häufig an GSM 954 MHz-Antennen arbeiten, und 6 gesunden Probanden entnommen. Nach der Kultivierung der Blutproben (48 Std.) erfolgt eine Analyse der strukturellen chromosomalen Aberrationen.

Obwohl in in vitro-Untersuchungen einige Proben eine erhöhte zytogenetische Schädigung zeigen, liefern die in vivo-Untersuchungen der

Blutproben von Antennen-Arbeitern keinen Hinweis auf einen vergleichbaren Einfluss der Mobilfunkfelder auf die Häufigkeit der chromosomalen Aberration.

Bei **Maes et al. (1993)** werden humane periphere Blut-Lymphozyten mit CW-2450 MHz-Mikrowellen 30 oder 120 Min. lang befeldet. Die Temperatur der Kulturlösung wird konstant bei 36,1 °C gehalten. Die Blutproben stammen von 2 Spendern, und zwar einem 38-jährigen Mann und einer 34-jährigen Frau. 48 und 72 Std. nach der Exposition und Zellvorbereitung werden chromosomale Aberrationen, die Frequenz des Schwesterchromatid-Austausches sowie die Inzidenz von Mikronuklei ermittelt. Nur die 120-minütige Exposition verursacht einen statistisch signifikanten Anstieg der Häufigkeit chromosomaler Aberrationen. In ähnlicher Weise steigt die Anzahl der Mikronuklei unter diesen Expositionsbedingungen. Die Häufigkeit des Schwesterchromatid-Austausches bleibt im Vergleich zur Kontrolle für beide Befeldungen gleich.

6.4.3 DNA-Brüche

Malyapa et al. (1998) überprüfen in einer Replikation die Ergebnisse der Arbeiten von Lai und Singh unter gut vergleichbaren Versuchsverhältnissen. Männliche Sprague-Dawley-Ratten mit einem Gewicht von ca. 250 g werden im zylindrischen Wellenleiter 2 Std. lang mit 2,45 GHz als kontinuierliche Welle befeldet. Die mittlere SAR beträgt 1,2 W/kg und wird kalorimetrisch ermittelt. Zusätzlich erfolgt eine Messung verschiedener Körpertemperaturen. 2 oder 4 Std. nach der Schein- oder Exposition werden die Tiere mit CO₂ oder mit der Guillotine getötet, um Proben vom Kortex und Hippocampus entnehmen zu können. Die Bestimmung der DNA-Brüche erfolgt elektrophoretisch. Die statistische Bewertung zeigt keine signifikanten Unterschiede in der Anzahl der DNA-Brüche zwischen den exponierten und den scheinexponierten Tieren. Diejenigen Tiere, die mit CO₂ eingeschläfert

werden, weisen eine höhere Anzahl von DNA-Brüchen auf.

Lai et al. (1996) verfeinern die vorangegangenen Untersuchungen, indem unter gleichen Versuchsbedingungen (2,45 GHz, 2 mW/cm², SAR 1,2 W/kg, CW- oder pulsmoduliert) in Untersuchungen an Ratten nicht nur einfache, sondern auch doppelte DNA-Brüche im Gehirn elektrophoretisch aufgenommen werden. Der statistische Vergleich der schein- und feldexponierten Proben 4 Std. nach der Exposition zeigt einen signifikanten Anstieg in beiden Arten von DNA-Brüchen. Die Wirkung der CW- und der pulsmodulierten Welle ist gleich. Die Autoren vermuten, dass eine Einflussnahme des Feldes auf die DNA-Reparaturmechanismen diese Veränderungen einleitet.

Lai und Singh (1995) berichten über einen statistisch signifikanten Anstieg der einfachen Strangbrüche der DNA im Hippocampus der Sprague-Dawley-Ratten nach der Exposition mit einem 2,45 GHz-Feld als kontinuierliche oder pulsmodulierter Welle (Pulsbreite 2 µs, 500 Pulse/s). Die räumlich gemittelte Leistungsdichte erreicht 1 oder 2 mW/cm², die SAR der applizierten Felder liegt bei 0,6 oder 1,2 W/kg. Insgesamt werden pro Untersuchung je 27 männliche Ratten (11 für die Kontrolle, 8 mit einer SAR von 0,6 W/kg, 8 mit einer SAR von 1,2 W/kg) mit einem Gewicht zwischen 250 g und 300 g herangezogen. Sofort und 4 Std. nach der Exposition wird die Anzahl der einzelnen DNA-Brüche im Hippocampus und im restlichen Gehirn mittels Elektrophorese bestimmt. Sofort nach der Exposition mit pulsmodulierten Mikrowellen bleibt die Anzahl der DNA-Brüche im Hippocampus wie auch im restlichen Gehirn im Vergleich zur Kontrolle unverändert. Ein konsistenter und statistisch signifikanter Anstieg der DNA-Brüche mit einer Erhöhung der SAR wird 4 Std. nach der Exposition beobachtet. Eine kontinuierliche Welle führt sofort wie auch 4 Std. nach der Exposition mit einer SAR von 1,2 W/kg zu einem statistisch signifikanten Anstieg der Anzahl von DNA-Brüchen.

Sarkar et al. (1994) ermitteln eine deutliche Erhöhung der DNA-Umstellung in Proben von Gehirn und Hoden, entnommen von Swiss-Albino-Mäusen nach einer Exposition mit einem 2,45 GHz-Feld (CW) bei einer Leistungsdichte von 1 mW/cm² und einer Ganzkörper-SAR von 1,18 W/kg im Vergleich zu Proben aus nichtexponierten Tieren. Die Expositionsdauer beträgt 2 Std./Tag, alternativ für 120, 150 und 200 Tage. Für die Experimente werden männliche, 5 Monate alte Tiere herangezogen. Je Expositionsschema werden 10 Tiere (4 Kontrollen, 6 Expositionen) angesetzt. Nach den Experimenten wird die DNA-Analyse elektrophoretisch vorgenommen.

6.4.4 Genmutation und -expression

Morrissey et al. (1999) setzen Mäuse in einer Kontroll- und in einer Feldgruppe 1 Std. lang alternativ einer kontinuierlichen oder pulsmodulierten IRIDIUM-Welle (9,2 µs Pulsbreite, 11 Hz Wiederholfrequenz) von 1,6 GHz-Mikrowellen aus. Die SAR im Gehirn der Tiere variiert bis über 3 W/kg. Die c-fos-Expression im Gehirn der Kontrollen und der exponierten Tiere bleibt vergleichbar, bis die mittlere SAR das 6-fache und der Spitzenwert der SAR das 30-fache der US-Norm überschreitet. Die statistisch signifikante Erhöhung der c-fos-Expression wird bei stärkeren SAR-Werten beobachtet, wobei kein Unterschied zwischen der CW- und pulsmodulierten Welle festzustellen ist.

Insbesondere in der thermoregulatorischen Region des Gehirns ergibt sich eine erhöhte Expression des c-fos-Gens. Die Resultate sprechen dafür, dass die thermische Wirkung der Mikrowellen die c-fos-Expression anhebt.

Andere Ergebnisse liefert die in vitro-Untersuchung von **Goswami et al. (1999)** an embryonalen Fibroblasten von C3H/10T-Mäusen. Fibroblasten sind Vorläufer der Fibrozyten, die das Bindegewebe z.B. der Gefäße ausbilden und bekanntlich durch Genmutation zu Tumorzellen transformiert werden können. Die Zellproben werden alternativ FM-

modulierten Mikrowellen von 835 MHz und CDMA-modulierten Mikrowellen von 847 MHz-Mikrowellen ausgesetzt. Für die Exposition der Feldproben bis zu 4 Tagen wird eine SAR von 0,6 W/kg geschätzt. Die Expression der c-fos-, c-jun- und c-myc-Gene, der feldexponierten und der Kontroll-Proben werden statistisch bewertet. Dabei ergibt sich ein schwacher, nicht signifikanter Anstieg der Expression der c-fos-Gene und keine Veränderung der Expression der c-myc- und c-jun-Gene. Die nicht konformen Ergebnisse beider Untersuchungen dürfen nicht überbewertet werden, da hier unterschiedliche Substrate zur Prüfung stehen.

Ivaschuk et al. (1997) führen in-vitro Untersuchungen an Krebszellen der Phäochromozyten in PC-12-Ratten durch, die maligne Tumore des chromatinen Gewebes mit 10%-iger Häufigkeit entwickeln. Gewebeproben werden 20, 40 und 60 Min. lang (20 Min. an, 20 Min. aus) TDMA-modulierten Mikrowellen mit einer Frequenz von 836,55 MHz bei einer Leistungsdichte zwischen 0,09 und 9 mW/cm² und einer SAR zwischen 0,5 und 5 mW/kg exponiert. Die Expression der c-jun- und c-fos-Gene der exponierten Proben wird mit Kontrollproben ohne Feldexposition verglichen. Im Vergleich ergibt sich in den exponierten Proben eine erhöhte Expression der c-jun-Gene bei der SAR von 5 mW/kg, wohingegen für die c-fos-Gene keine statistisch signifikante Expressions-Veränderung resultiert.

Bei in vivo Studien bezüglich der Wirkung der Felder von Mobilfunk-Systemen mit Ratten und Mäusen steht die Genexpression im Gehirngewebe im Vordergrund.

Fritze et al. (1997) führen vergleichende in-vitro-Untersuchungen mit männlichen Wistar-Ratten durch, bei denen die Änderung der Messenger-RNAs, des Hitzeschock-Proteins hsp70 sowie der c-fos-, c-jun- und GFAP-Gene nach einer 4-stündigen Feldexposition mit einer Frequenz von 915 MHz und ohne Feldexposition ermittelt werden. In der Studie werden alternativ kontinuierliche und GSM-modulierte Wellen appliziert. Die SAR beträgt 0,3 und 1,5 W/kg bei GSM-Modulation und bis zu 7,5 W/kg bei CW-Modulation. Die Ergebnisse zeigen eine schwa-

che Induktion der hsp70-Messenger-RNAs im Kleinhirn und Hippocampus, und zwar nur sofort nach der Exposition bei den Tieren, die der höchsten SAR ausgesetzt wurden. Die dabei auftretende Hirn-Erwärmung muss als sehr wahrscheinliche Ursache für die beobachteten Effekte betrachtet werden.

6.5 Diskussion von Studien zum Krebsgeschehen

Die Frage nach einem eventuellen Effekt der im Alltag auftretenden hochfrequenten Felder auf das Krebsgeschehen steht seit mindestens zwei Jahrzehnten im Vordergrund der Forschung auf diesem Gebiet. Es wurde bisher eine Reihe von epidemiologischen, tierexperimentellen Studien und in vitro-Untersuchungen durchgeführt, die zusammen kein deutliches Bild im Mosaik des Wissens erkennen lassen.

Epidemiologische Untersuchungen versprechen, einen Hinweis auf eine potentielle gesundheitsschädigende Wirkung eines im Verdacht stehenden Einflussfaktors zu geben. Die statistischen Ergebnisse epidemiologischer Untersuchungen können einen als Arbeitshypothese aufgestellten Verdacht eines Risikos zwar erhärten, eine Kausalität der ermittelten Korrelation ist damit jedoch in keiner Weise gesichert. Ein eventuell ursächlicher Zusammenhang zwischen einer Erkrankung und einem Einflussfaktor kann nur in Tierexperimenten und in vitro Untersuchungen nachgewiesen werden.

Damit von den vorgestellten epidemiologischen Studien das Risiko einer gesundheitsschädigenden Wirkung der Mikrowellen abgeleitet werden kann, müssten viele Grundbedingungen erfüllt werden. Da in jeder epidemiologischen Untersuchung die Häufigkeit einer oder mehrerer Erkrankungen von mindestens zwei Gruppen miteinander verglichen wird, sollen bis auf einen betrachteten Einflussfaktor alle anderen Umweltfaktoren und Lebensbedingungen in den Fall- und Kontrollgruppen bekannt sein und möglichst gut übereinstimmen. Diese Forderung ist insbesondere in Bezug auf die soziodemographischen

Daten und die die Lebenshaltung charakterisierenden Einflüsse, trotz der Bemühung der Autoren nicht erfüllt. Die zwangsläufigen Unstimmigkeiten bringen eine schwer kalkulierbare Verfälschung der Ergebnisse mit sich.

Generell sind die Ergebnisse epidemiologischer Untersuchung verlässlicher, wenn

- ein starker Zusammenhang zwischen einer Erkrankung und einem Einwirkfaktor vorliegt
- die an einem Krankheitsgeschehen beteiligten Kofaktoren bekannt sind
- der Einfluss der Kofaktoren in Fall- und Kontrollgruppe etwa gleich ist
- die Expositionsbedingungen bezüglich der Stärke und Einwirkdauer der betrachteten Einflussfaktoren bekannt sind, und
- gemessen an der Prävalenz einer Erkrankung adäquat große Fall- und Kontrollgruppen bzw. Kohorten zur Untersuchung herangezogen werden.

Diese Grundforderungen scheinen in keiner bisher durchgeführten epidemiologischen Studie erfüllt zu sein.

Eine weitere Unsicherheit in den präsentierten retrospektiven Studien ist die Schwierigkeit, die Stärke und Einwirkdauer der häufig untersuchten Mobilfunkfelder nachträglich korrekt zu ermitteln. Wegen der großen Abdeckung der städtischen wie auch ländlichen Gebiete mit den Feldern der Mobilfunkbasisstationen ist es schwierig oder gar unmöglich, eine vergleichbare Kontrollgruppe ohne Exposition zu finden. Darüber hinaus muss mit sehr unterschiedlichen Expositionsbedingungen einer jeden einzelnen Person in Abhängigkeit von ihrem jeweiligen Aufenthaltsort gerechnet werden, da die Feldstärken dieser Felder nicht nur vom Abstand von der Antenne, sondern auch von vielen anderen Faktoren, wie z.B. Art und Umfang der Bebauung, abhängig ist. Schließlich ist eine Fokussierung auf die Felder der Mobilfunkbasisstationen ohne Berücksichtigung der an Ort und Stelle häufig wesentlich stärker auftretenden elektromagneti-

schen Felder der Fernseh- und UKW-Sender wenig sinnvoll.

Unter der Prämisse, dass eventuelle Einflüsse stärkerer Felder deutlich zu erkennen sind, haben sich die bisher durchgeführten epidemiologischen Untersuchungen vorwiegend auf die Felder der Handys konzentriert. Alle bisherigen Untersuchungen, einschließlich der im Abschnitt 5.2 diskutierten epidemiologischen Studien zu den Feldern der Handys, zeigen trotz der aufgeführten Einschränkungen fast übereinstimmend ein niedriges relatives Risiko, das im Bereich der statistischen Unsicherheit liegt. Nur wenige Arbeiten mit kleinen Vergleichsgruppen haben für analoge Mobilfunkfelder OR-Werte über 2 ergeben. Für die digitalen GSM-Mobilfunkfelder, wie sie in Deutschland heute ausschließlich Verwendung finden, mit der Stärke von Handy-Feldern gibt es kein Ergebnis, das die Hypothese einer Mitwirkung dieser Mikrowellen beim Krebsgeschehen stützen würde. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die Felder der Basisstationen noch etwa 1000fach schwächer sind, womit eine Wirkung noch unwahrscheinlicher wird.

Der Vergleich der Seitigkeit von Handy-Nutzung und des Auftretens von Tumoren liefert in einigen Studien für die gleiche Seite höhere OR-Werte. Diese Ergebnisse ergeben sich unter der Berücksichtigung von OR-Werten unter 1 für die abweichende Seite der Handy-Nutzung und das Auftreten von Tumoren. Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass eine Nichtexposition zur Unterdrückung der Tumoren führt, beruht das Ergebnis eines höheren Risikos für die Gleichseitigkeit auf unzulänglichen statistischen Vergleichen kleiner Gruppen.

Auf der Grundlage der Erfahrung, dass, falls überhaupt, nur mit schwachen Effekten zu rechnen ist, lassen sich für zukünftige epidemiologische Untersuchungen folgende Empfehlungen ableiten:

- Nur für die Felder der Handys lässt sich eine klare Unterscheidung zwischen einer exponierten und einer nichtexponierten Gruppe treffen.
- Die Untersuchungen sollen prospektiv durchgeführt werden, damit möglichst viele Faktoren und Kofaktoren korrekt ermittelt und quantitativ bestimmt werden können.
- Die Kohorten müssen größere Patientengruppen umfassen, damit eine statistisch sichere Aussage getroffen werden kann. Dies verlangt eine Erweiterung der epidemiologischen Untersuchungen auf eine breite Bevölkerungsbasis.
- Bei der Auswahl der zu bewertenden Gruppen muss die Latenzzeit einiger Erkrankungen berücksichtigt werden, die bei z.B. Gehirntumoren zwischen 2 und 16 Jahren liegt.
- Für die Dosimetrie muss ein Verfahren entwickelt werden, mit dem die Expositionsstärke pro Zeiteinheit sicher ermittelt werden kann.

Vollständigkeitshalber muss darauf hingewiesen werden, dass unter Berücksichtigung der bisherigen Arbeiten die epidemiologischen Untersuchungen bezüglich einer eventuellen Wirkung der Mobilfunkfelder auf den Menschen sehr umfangreich angelegt werden müssen, wofür man großen zeitlichen und finanziellen Aufwand kalkulieren muss. Eine umfassende epidemiologische Untersuchung zu eventuellen gesundheitlichen Wirkungen von Handys wird in mehreren europäischen Ländern durchgeführt.

Die Mehrheit der Tierexperimente zur Karzinogenese mit spontanen, chemisch induzierten und durch Implantation von Krebszellen initiierten Tumoren zeigt übereinstimmend keine promovierende Wirkung von Mikrowellen. Diese Erfahrung wurde gewonnen aus Mikrowellen, deren Frequenz zwischen 870 MHz und 2,45 GHz liegt, und die unterschiedliche Modulationen (CW, Frequenzmodulation, Pulsmodulation, GSM, NADC, CDMA, etc.) aufweisen.

In Experimenten werden Felder mit Leistungsdichten und SAR-Werten verwendet, die vergleichbar oder höher liegen als die stärksten auf den Menschen im Alltag einwirkenden D-Netze Felder von Handys. Die Ergebnisse geben keinen Hinweis auf eine krebspromovierende Wir-

kung der Handy-Felder. Umso mehr gilt diese Feststellung für die Felder der Basisstationen, die mindestens um einen Faktor 1000 schwächer sind als die Felder der Handys. Auf der anderen Seite wird zu Recht argumentiert, dass zu wenige Langzeituntersuchungen durchgeführt wurden.

Es liegt nur eine Arbeit (Repacholi et al., 1997) vor, die bei transgenen Tieren eine Erhöhung des OR-Wertes über 2 ergibt. Die schlechte Dosimetrie mindert jedoch die Aussagekraft dieser Studie.

Die versuchte Replikation durch Utteridge et al., 2002, mit wesentlich größeren Versuchsgruppen transgener Mäuse und verbesserter Dosimetrie kann die vorherigen Befunde nicht bestätigen. Auch wenn diese Studie wegen abweichender Versuchsbedingungen nicht als eine vollständige Replikation gewertet werden kann, muss ihr Ergebnis als ein Widerspruch zum Repacholi-Resultat gesehen werden.

In in vitro-Studien wird versucht, eine eventuelle krebsinitiiierende oder –promovierende Wirkung der Mikrowellen auf unterschiedlichen zytogenetischen Ebenen nachzuweisen.

Die Bildung von DNA-Strangbrüchen wird als Hinweis auf eine Schädigung verstanden, die zur Initiation von Krebs führen kann. Allerdings liefern die heutigen Techniken zum Nachweis der DNA-Brüche keine verlässlichen Daten. Insbesondere die von Lai et al. berichteten Ergebnisse über eine erhöhte Inzidenz von einfachen und doppelten DNA-Brüchen im Hirngewebe unter der Einwirkung athermischer Mikrowellen haben nicht nur bei Experten, sondern auch in der Öffentlichkeit viele Emotionen geweckt. Unbedachte Interpretationen dieser Resultate haben gar zu der Behauptung geführt, dass auch Felder von Mobilfunkanlagen auf diese Weise zur Initiierung des Krebsgeschehens führen könnten.

In nachfolgenden Replikationen, z.B. von Malyapa et al., konnte aber gezeigt werden, welche Unsicherheiten durch verschiedene Faktoren,

wie z. B. der Art der Tötung der Tiere, bei der Bewertung von DNA-Brüchen entstehen können.

Die bisherigen Studien zur chromosomalen Aberration unter der Wirkung von Mikrowellen liefern keine konsistenten Ergebnisse. Die Mehrheit der Arbeiten in relativ starken und lange einwirkenden Feldern verneint die Existenz solcher Wirkungen. Darüber hinaus ist es nicht ausgeschlossen, dass die positiven Befunde auf eine thermische Wirkung der Mikrowellen zurückzuführen sind. In vivo-Untersuchungen mit Monteuren von GSM-Antennen deuten ebenfalls auf eine negative Wirkung von relativ starken Mobilfunkfelder in unmittelbarer Antennenumgebung hin. Allerdings wurden diese Untersuchungen mit nur 6 Arbeitern durchgeführt, die Dosimetrie ist völlig unklar. Weitere Untersuchungen, insbesondere des Personals in Arbeitsbereichen mit starken GSM-Feldern, sind erforderlich, um eine schlüssige Beantwortung der gestellten Fragen zu gewährleisten.

Die vorgestellten Untersuchungen zeigen unterschiedliche Schädigungen der Zelle auf der Gen-Ebene unter der Einwirkung von Mikrowellen mit thermischem wie auch athermischem Charakter. Am häufigsten wird über eine Veränderung der Expression der c-fos-Gene berichtet. Die Einzelergebnisse sind nicht konsistent, was wegen unterschiedlicher Ansätze auch nicht in vollem Umfang zu erwarten ist. Für eine mutmaßliche athermische Wirkung der Mikrowellen wird auch keine eindeutige Tendenz gezeigt. Dagegen ist offensichtlich, dass dann, wenn Mikrowellen eine Erwärmung des Hirngewebes um einige Grad Celsius verursachen, auch reproduzierbare Effekte auf die Genexpression ermittelt werden. Allerdings werden derart starke Felder in keinem frei zugänglichen Bereich von Hochfrequenz-Anlagen aufgebaut.

Die Literatur zur Karzinogenese durch die Einwirkung hochfrequenter Felder deckt bei weitem nicht den gesamten zu betrachtenden Frequenzbereich ab. Die meisten Untersuchungen wurden zur Wirkung der Felder des Mobilfunks durchgeführt; nur für diesen Bereich lässt sich eine grobe Bewertung abgeben. Die Ergebnisse sind hier sehr heterogen und nicht konsistent. In

einigen in vitro-Studien werden Effekte festgestellt, aber auch hier ist es nicht klar, ob es sich um Artefakte der Versuchsdurchführung oder der Auswertung handelt. Durch mehrere Forschungsgruppen erbrachte wissenschaftliche Befunde liegen bislang nicht vor. Es sind auch keine nachvollziehbaren physikalischen/ physio-

logischen Wirkungsmechanismen bekannt, die für diese Effekte in Frage kämen. Daher müssen, bevor aus den wenigen vorliegenden positiven Befunden Rückschlüsse abgeleitet werden können, zuerst Existenz und Relevanz der gemeldeten Effekte sicher belegt werden.

7. Das Zentralnervensystem (ZNS) in den hochfrequenten Feldern

7.1 Relevanz und Verfahren

Einer eventuellen Einwirkung der Mobilfunkfelder auf das Zentralnervensystem (ZNS) muss besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden, da

- das ZNS alle vitalen Vorgänge im Organismus neural und hormonell steuert,
- im ZNS die gesamte Verarbeitung und Speicherung der vom Äußeren wie vom Inneren des Körpers zugeführten Informationen erfolgt, und
- bei Anlegung eines in Betrieb befindlichen Handys im Bereich des Kopfes die stärksten Felder des Mobilfunks auftreten.

Wegen der vielfältigen und komplexen Funktionen des Gehirns ist der Beweis einer Einwirkung durch äußere Einflüsse insbesondere dann sehr schwierig, wenn schwache Effekte vorliegen. Eine integrale Überprüfung der Funktionalität des Gehirns und dessen möglicher Beeinflussung ist nicht möglich, weshalb sich die psychologischen und neurologischen Testverfahren auf die Überprüfung einzelner Prozesse beschränken müssen.

So werden zugeschnittene Tests zur Überprüfung der Beeinflussung der Efferenzsysteme des ZNS verwendet, die die Kommandos für die Erfolgsorgane bereitstellen. Die somatomotorischen Efferenzsysteme, die die Rumpf- und Extremitätenmuskulatur steuern, werden z.B. mit Reaktionstests geprüft. Allerdings ändern sich solche Reizantworten infolge komplexer Bahnungs- und Hemmungserscheinungen in kortikalen Neuronen.

Vegetative Efferenzsysteme können über die Überprüfung der Funktion der inneren Organe (z.B. im Falle der Steuerung des Herzkreislaufs über die Herzfrequenz, den Blutdruck, etc.) vorgenommen werden.

Die einfachste Form der Koordination zwischen afferenten und efferenten Teilen des ZNS spiegelt sich in Reflexen wider, deren Beeinflussung durch äußere Einflüsse mit verschiedenen physiologischen und neurologischen Messmethoden überprüft werden kann.

Wesentlich problematischer ist die Erfassung der höheren Nerventätigkeit, die sich durch komplexe kognitive Prozesse auszeichnet. Assoziative Leistungen wie Verhalten, Emotion und Motivation, Kurz- und Langzeitgedächtnis sowie Bewusstseinsprozesse sind in den meisten Fällen nur über aufwendige psychologische Tests zugänglich. Wegen der zwangsläufigen Variation der Einzelergebnisse ist auch das Gesamtergebnis mit einer gebührenden Unsicherheit behaftet. Bei der Betrachtung eventueller Umwelteinflüsse auf das Zentralnervensystem stellt sich die Frage nach der Beeinflussung der Bewusstseinsprozesse, die sich mit einer unterschiedlichen Aktivierung und Leistung des ZNS charakterisieren lassen. Aus der breiten Skala möglicher physiologischer Zustände bietet der Schlaf einen besonderen Einblick, da diese Phase mit einer niedrigen Aktivität und einer mittleren bis niedrigen Leistung des ZNS einhergeht.

Bei der Untersuchung der Bewusstseinsprozesse im ZNS wird parallel zu den subjektiven psychologischen und neurologischen Testmethoden die Aufnahme des Elektroenzephalogramms (EEG) in bis zu 128 Ableitungen zur Diagnose herangezogen. Da das EEG die elektrische Summenaktivität insbesondere der oberflächlichen Hirnrinden-Areale erfasst, ist die eindeutige Zuordnung zwischen den EEG-Mustern und dem Geschehen im Gehirn nur bei einer niedrigen Aktivität und Leistung des ZNS, wie z. B. im Schlaf, möglich. So können verschiedene Wach- bzw. Schlafstadien, wie z. B.

- aktiv wach mit Kontrolle des Verhaltens und Problemlösen
- entspannt mit spontanen Gedanken und Fantasie

- Schlafstadium 1 mit Hypnagogen, Halluzinationen (fragmentarisches Bildmaterial und Träumen)
- Schlafstadium 2-4 mit Gedankenketten, Tageserinnerungen und Traumbruchstücken unter geringer emotionaler Beteiligung
- REM-Phase mit Träumen (visuell, dramatisch, emotional)

aus dem EEG grob abgegrenzt werden.

Die Beurteilung der Bewusstseinsprozesse mit einer hohen Aktivierung und Leistung des ZNS, wie es beim Wach- und Erregungszustand der Fall ist, sind jedoch allein mittels des EEG nur schwer und ungenau möglich. Dagegen erlauben elektrische Antworten einzelner Gehirnregionen auf definierte Reize eine gute Charakterisierung einzelner Systeme. Sie werden durch eine reizsynchrone Mittelung aus dem EEG gewonnen und als evozierte Potentiale bezeichnet. Wegen der Problematik, eventuelle schwache Einflüsse der Mikrowellen auf das ZNS objektiv mittels EEG oder subjektiv mittels psychologischer und neurologischer Untersuchungsmethoden möglicherweise nicht herausfinden zu können, werden zur Beweisführung zusätzlich unterschiedliche Untersuchungen des Stoffwechsels im ZNS herangezogen. Die Ergebnisse versprechen Auskunft über eventuelle Wirkungsmechanismen der Mikrowellen im Gehirn zu geben. Im Zusammenhang mit der Einwirkung von elektromagnetischen Feldern werden Untersuchungen der Blut-Hirn-Schranke, der Neurotransmitter im Gehirn sowie des Kalziumhaushaltes in Neuronen vorgenommen.

Die Blut-Hirn-Schranke erfüllt eine allgemeine Schutzfunktion des Gehirns gegenüber unerwünschten stofflichen Einflüssen. Es ist bisher nicht hinreichend geklärt, warum manche Stoffe und Gase durch die Blut-Hirn-Schranke diffundieren können, andere aber nicht. Einige Stoffe, die die Blut-Hirn-Schranke nicht zu passieren vermögen, können vom Blut in den Liquor und von dort aus in das ZNS gelangen. Dabei ist die Funktion des Liquor mit einer auffällig konstanten Ionenkonzentration im Vergleich zum Blut nicht ausreichend geklärt. Die Durchlässigkeit der Blut-Hirn- und Blut-Liquor-Schranken ist

nicht nur stoffspezifisch, sondern unterliegt auch einer großen biologischen Variabilität, was bei vergleichenden Untersuchungen Berücksichtigung finden muss.

Gemäß der auferlegten Systematik werden zuerst solche Literaturgruppen zu folgenden mutmaßlichen Einflüssen von Mikrowellen auf

- Wohlbefinden und Verhalten
- kognitive Funktionen
- Schlaf

behandelt, die klare Endpunkte aufweisen. Insbesondere bei der Untersuchung des Verhaltens sind Tierexperimente vorteilhaft, da hier die psychische Komponente eliminiert wird.

Dagegen verfolgen Untersuchungen zur Beeinflussung von:

- EEG und anderen elektrophysiologischen Signalen
- Blut-Hirn-Schranke
- Kalziumhaushalt

zuerst keine Symptome, die Konsequenzen einer eventuellen Beeinträchtigung könnten aber von einem harmlosen Effekt bis zu einer Reihe lebensbedrohlicher Situationen reichen.

Um den unterschiedlichen Endpunkten gerecht zu werden, behandeln und diskutieren wir die einzelnen Komplexe getrennt.

7.2 Epidemiologische Studien zu gesundheitlichen Beschwerden durch Mobilfunkfelder

Wilen et al. (2003) nehmen Bezug auf die Studie von **Sandström (2001)** und bewerten die Prävalenz gemeldeter subjektiver Symptome von 2402 Nutzern der digitalen GSM-Handys zusammen mit Anzahl und Dauer der Telefonate. Darüber hinaus werden die SAR der benutzten Geräte gemessen und Nutzungszeiten ermittelt, um 2 weitere Parameter, die SAC (SAR pro Anruf) und SAD (SAR pro Tag), bilden zu können. Die Resultate einer multifaktoriellen Analyse zeigen, dass SAR größer 0,5 W/kg und lange Anrufe Faktoren sind, die zusammen genommen

eine gute Assoziation mit der Häufigkeit der Symptome ergeben.

Santini et al. (2003) befragen 530 Bewohner (270 Männer, 260 Frauen), die in der Nähe einer Mobilfunkbasisstation wohnen, nach subjektiven Beschwerden. Im Fragebogen können 18 unterschiedliche Beschwerden nach NSHS-Standard angegeben werden. Die Häufigkeit der Beschwerden variiert zwischen 0 und 76 %, wobei nur bei 5 Beschwerdearten die höchste Häufigkeit (18-76 %) bei Einwohnern vorkommt, die in einem Abstand von weniger als 10 m vom Sendemast wohnen. Die maximalen Häufigkeiten für die restlichen 13 Beschwerden verteilen sich ungleichmäßig auf entferntere Zonen mit einem Abstand bis zu 300 m vom Sendemast. Mit dem Alter nimmt die Häufigkeit der Beschwerden zu. Die Autoren leiten von diesen Ergebnissen eine geschlechts-, alters- und abstandsspezifische Wirkung von Mobilfunkfeldern ab.

Hietanen et al. (2002) führen Provokationsstudien zur Überprüfung der sogenannten Hypersensibilität-Symptome bei 13 weiblichen und 7 männlichen Probanden durch, die unterschiedliche Beschwerden durch Mobilfunkfelder angeben. Die Exposition erfolgt alternativ mit analogen NMT- oder digitalen GSM-Mobilfunkfeldern mit einer Frequenz von 900 MHz oder 1800 MHz. Die mittlere Leistung beträgt dabei, wie bei herkömmlichen Handys 0,125 W oder 0,25 W. Jede einstündige Sitzung besteht aus 3 bis 4 zufällig verteilten Kontroll- oder Expositionsphasen. Die Testpersonen sollen wahrgenommene Symptome sofort melden, darüber hinaus erfolgen alle 5 Minuten Messungen des Blutdrucks sowie der Herz- und Atemfrequenz. Insgesamt wurden unterschiedliche Symptome insbesondere von der Kopfregion gemeldet. Allerdings ist die Häufigkeit dieser Meldungen in der Phase der Scheinexposition höher als während der tatsächlichen Exposition mit Mobilfunkfeldern. Daraus wird abgeleitet, dass die subjektiv festgestellten Symptome eine andere Ursache als Felder haben müssen. Die sich selbst für elektrosensibel haltenden Personen können das Ein- oder Ausschalten der Handys nicht erkennen, und zwar weder der analogen noch der digitalen Geräte.

Koivisto et al. (2001) untersuchen die Existenz subjektiver Symptome unter der Einwirkung von GSM-Mobilfunkfeldern in Provokationsstudien mit Probanden. Je 24 männliche und weibliche Probanden nehmen an den Experimenten 1 und 2 teil. Das Alter der gesunden Probanden variiert zwischen 18 und 49 Jahren (Mittelwert 26 Jahre) in Experiment 1 und zwischen 18 und 34 Jahren (Mittelwert 23,2 Jahre) in Experiment 2.

In Experiment 1 werden in zwei Sektionen, die 24 Stunden voneinander getrennt sind, eine Hälfte im ersten Teil und die zweite Hälfte im zweiten Teil, jeweils 60 Minuten lang exponiert. In Experiment 2 beträgt die Exposition 30 Minuten. Zur Exposition werden herkömmliche GSM-Mobilfunkfelder eines Handys mit einer mittleren Leistung von 0,25 Watt verwendet. In beiden Experimenten beantworten Probanden Fragen bezüglich einer Wahrnehmung oder Beschwerden und bewerten ihre Intensität mit Punkten. Die berichteten Effekte sind Kopfschmerzen, leichter Schwindel, Müdigkeit, Jucken und Hautverfärbung. Allerdings besteht bei der Zuordnung dieser Symptome zur Kontroll- oder Expositionsphase keine signifikante Differenz. Die Autoren schließen aus diesem Ergebnis, dass eine 20- bis 60-minütige Exposition keinen Einfluss auf die kognitiven Funktionen der Probanden hat.

Sandström et al. (2001) untersuchen per Fragebogen die Häufigkeit subjektiver Symptome wie Kopfschmerzen, Wärmeempfindung, Konzentrationsprobleme oder anderer Beschwerden bei 6379 Nutzern von analogen (NMT) und 5613 Nutzern von digitalen (GSM) Handys in Schweden. Jeweils 2500 Nutzer beider Handy-Typen wurden aus Norwegen herangezogen. Die Bewertung zeigt mit OR-Werten um 1 keinen Unterschied zwischen GSM- und NMT-Handys. Statistisch signifikant ist nur, dass bei GSM-Handy-Nutzung weniger häufig über Wärmeempfindung berichtet wird.

Oftedal et al. (2000) führen eine Studie der Prävalenz subjektiver Symptome mit 17000 Schweden und Norwegern durch, alles Nutzer von analogen und digitalen Handys. Alle Teilnehmer füllen einen Fragebogen mit persönlichen Daten,

11 Symptomen und dem Zeitpunkt des Einsetzens der Symptome aus. 31% der Befragten in Norwegen und 13 % in Schweden geben mindestens 1 Symptom als Folge der Nutzung von Handys an. Die meisten Symptome beginnen während oder eine ½ Stunde nach dem Gespräch und halten bis zu 2 Stunden an. 45 % der Befragten haben verschiedene Maßnahmen zur Reduktion der Symptome ergriffen, wie z.B. die Verkürzung der Gespräche, auf die Nutzung völlig verzichtet hat aber niemand. Davon leiten die Autoren ab, dass es sich bei den Symptomen nicht um gesundheitlichen Probleme handelt.

Hansson Mild et al. (1998) präsentieren eine Studie mit über 11000 Handy-Nutzern bezüglich der subjektiven gesundheitlichen Beeinträchtigung durch die Felder von analogen und digitalen Handys. Die berichteten Symptome treten hauptsächlich im Bereich des Kopfes auf und beinhalten subjektive Beschwerden wie Kopfschmerz, Müdigkeit, Wärme- und Schmerzempfindung etc. Etwa 13 % der befragten Nutzer von Handys in Schweden und 30 % in Norwegen geben mindestens ein Symptom im Zusammenhang mit der Benutzung von Handys zu Protokoll. Bei analogen wie auch digitalen Handys erhöht sich die Prävalenz der Symptome mit der Dauer des Gespräches, wobei die Häufigkeit der Beschwerden bei den digitalen GSM-Handys geringer ist.

Die berichteten relativ hohen Fallzahlen an Beschwerden müssen in Relation zu der intensiven und oft emotional geführten öffentlichen Diskussion in den skandinavischen Ländern über eine eventuelle gesundheitliche Beeinträchtigung durch die elektromagnetischen Felder im allgemeinen gesehen werden. Ähnliche Erhebungen über subjektive Symptome im Zusammenhang mit anderen, auch niederfrequenten Quellen elektromagnetischer Felder, haben in Schweden und Norwegen grundsätzlich sehr hohe Prävalenzen im Vergleich zu anderen europäischen Ländern und den USA ergeben. Eine objektive Überprüfung dieser Ergebnisse wäre nur in komplizierten Testsequenzen mit einer hohen Anzahl von betroffenen Personen möglich.

Altpeter et al. (1995) untersuchen im Umkreis von wenigen Kilometern um den Kurzwellensender der Schwarzenburg (Schweiz) die Beziehung zwischen dem Gesundheitszustand der Bevölkerung und den vom Sender aufgebauten Feldern. Bei der Bevölkerung in der Nähe des Senders finden sich häufig gesundheitliche Beschwerden wie Nervosität, Unruhe, Schlaflosigkeit, allgemeine Schwäche, Müdigkeit und Gliederschmerzen. In Querschnittstudien zeigen die Autoren wiederholt, dass die Schlafstörungen mit der Nähe zum Sender zunehmen und stellen damit eine räumliche Assoziation zu diesen unspezifischen Beschwerden her. Es wird eine direkte Beziehung zwischen den Feldern der Sender und einer Verschlechterung der Schlafqualität als höchst wahrscheinlich postuliert. Nach dem Abschalten des Senders gingen die Schlafstörungen rapide zurück. Die Anzahl der berücksichtigten Personen ist allerdings zu klein, um überhaupt eine Statistik zu betreiben. Die Studie wurde nicht im Doppelblind-Versuch durchgeführt, die Befindlichkeitsstörungen sind nur an Hand von beantworteten Fragebogen bewertet. Es existiert auch keine individuelle messtechnische Bestimmung der Feldstärken. Obwohl diese Studie häufig zitiert wird, kann sie auf Grund der vielen offensichtlichen Mängel nicht als aussagekräftige epidemiologische Untersuchung akzeptiert werden. Sie hat aber auf jeden Fall eine initiale Wirkung für eine Reihe von nachfolgenden epidemiologischen Studien und Laboruntersuchungen, denen besser kontrollierte Versuchsbedingungen zu Grunde liegen.

7.3 Beeinflussung kognitiver Funktionen

Kognitive Funktionen stellen einen sehr empfindlichen Indikator für die Überprüfung einer eventuellen Einwirkung von Mikrowellen auf die höhere Funktion des Zentralnervensystems dar. Dabei müssen die Vielschichtigkeit und Komplexität der höheren ZNS-Leistungen sowie große individuelle Unterschiede und intraindividuelle Schwankungen der Ergebnisse in Kauf genommen werden. Darüber hinaus können verschiede-

dene psychische oder Umweltfaktoren (u. a. Konzentration, Motivation oder auch Alkoholkonsum) die Resultate wesentlich verfälschen. Deshalb erfordert eine derartige Untersuchung streng standardisierte Versuchsbedingungen, eine sorgfältige Auswahl und Beobachtung von Probanden, ausreichend große Fall- und Kontrollgruppen sowie eine exakte Beschreibung der Testabläufe und Expositionsbedingungen. Neuere Untersuchungen erfüllen weitgehend diese Anforderungen.

Haarala et al. (2003) replizieren frühere Studien zur Beeinflussung der humanen kognitiven Funktionen unter Einfluss von 902 MHz GSM-Mobilfunkfeldern. Die SAR-Werte liegen zwischen 0,88 und 1,2 W/kg, gemittelt über ein Gramm Körpermasse. 64 Probanden (je 32 männlich und 32 weiblich) im Alter zwischen 20 und 42 Jahren werden in einer multizentrischen Doppelblindstudie mit neun standardisierten kognitiven Aufgaben in zwei unabhängigen Labors getestet. Die Ergebnisse, jeweils 2 Kontroll- und Expositionsphasen pro Proband, werden statistisch bewertet. Die Resultate zeigen in beiden Labors (Schweden und Finnland) keine signifikanten Unterschiede zwischen den Kontroll- und Feldphasen. Auch die mehrfach berichtete Verkürzung der Reaktionszeit unter Einfluss von Mobilfunkfeldern konnte nicht bestätigt werden. Die Autoren schließen aus dem Befund, dass die applizierten Mobilfunkfelder keine sofortige Wirkung auf die kognitiven Funktionen ausüben oder der Effekt so klein ist, dass er nur gelegentlich beobachtet werden kann.

Edelstyn et al. (2002) untersuchen Einflüsse der Mikrowellen von GSM-Mobilfunkanlagen auf die Aufmerksamkeit von 28 Probanden. 28 Studenten im Alter zwischen 20 und 22 Jahren (Mittelwert 21) werden in einer Blindstudie herangezogen und dürfen 24 Stunden vorher weder Alkohol noch Medikamente zu sich nehmen. Die Probanden werden zufällig in zwei gleich große Gruppen eingeteilt, wobei nur in einer Gruppe das Handy eingeschaltet wird. Die Exposition mit 900 MHz und eine SAR von 1,19 W/kg wird mit herkömmlichen Handys vorgenommen, die mit der linken Hand am linken Ohr 30 Minuten lang gehalten werden. Kognitive neurophysiologische

Tests werden 15 Minuten vor und 15 und 30 Minuten nach der Exposition ausgeführt. Die Aufmerksamkeitskapazität wird aus 4 standardisierten Tests (DSF, DSB, SSF und SSB) ermittelt. Signifikante Unterschiede zwischen der exponierten und scheinexponierten Gruppe sind in 3 Tests nach 5 Minuten Exposition feststellbar. Alle drei Tests zeigen eine Verbesserung der Ausführbarkeit der Aufgaben während der Exposition. Es werden keine Defizite der Aufmerksamkeit festgestellt.

Koivisto et al. (2000) untersuchen Veränderungen kognitiver Funktionen an 48 gesunden Probanden (24 männlich, 24 weiblich) mit einem Durchschnittsalter von 26 Jahren (18-49 Jahre) unter der Einwirkung von GSM-Handy-Feldern (Frequenz 902 MHz, mittlere Leistung 0,25 W). Bei allen Probanden wird für die Untersuchungen ein Handy an der linken Kopfseite in der normalen Sprech- und Hörposition angelegt. In den beiden einstündigen Untersuchungsphasen wird das Handy alternativ eingeschaltet (Feldphase) oder ausgeschaltet (Kontrollphase). Während jeder Phase werden die Probanden 6 verschiedenen standardisierten Tests der perzeptiven und motorischen kognitiven Leistung unterzogen, wobei als Beurteilungsmaß die jeweilige Reaktionszeit dient. Die statistische Bewertung der Ergebnisse mit dem nichtparametrischen Wilcoxon-Test ergibt für alle Tests in der Kontroll- wie auch in der Feldphase etwa das gleiche niedrige Niveau um 3 %. Aus dem Vergleich zwischen der Feld- und der Kontrollphase resultiert eine statistisch signifikante Verkürzung der einfachen Reaktionszeit um 3 %, der Vigilanz um 11 % und der kognitiven Reaktionszeit bei Subtraktion um fast 12 %.

Preece et al. (1999) führen eine Untersuchung der kognitiven Funktionen des Menschen im 915 MHz-Feld ohne Modulation (CW) oder mit einer GSM-pulsmodulierten Welle (217 Hz, Tastverhältnis 1:8) durch. Die Exposition einzelner Personen dauert 25-30 Min., wobei das Feld mit einer mittleren Leistung von 1 W bei einer CW-Welle und mit 0,125 W bei einer pulsmodulierten Welle an der linken Kopfseite appliziert wird. Die Kontrollphase A wechselt mit Feldphasen B (kontinuierliche Welle) und C (Pulsmodulation

mit 217 Hz, Tastverhältnis 1:8) in randomisierter Abfolge, jeweils in 25-30 Min. dauernden Intervallen. Insgesamt werden 18 Probanden (9 männlich, 9 weiblich) im Alter zwischen 21 und 60 Jahren mit einem Durchschnittsalter von 38 Jahren herangezogen.

Zur Überprüfung der kognitiven Leistungen mit und ohne Feldeinwirkung werden 15 verschiedene standardisierte Tests der sofortigen Wortwiedergabe, der einfachen und verzögerten Bilddarstellung, der einfachen, verzögerten, kontrollierten und räumlichen Reaktionszeit, der Vigilanz-Reaktionszeit, des räumlichen Arbeitsgedächtnisses und der Wort- und Bilderkennung bezüglich der Reaktionsgeschwindigkeit und Reaktionsgenauigkeit durchgeführt. Die statistische Bewertung erfolgt alternativ mit einem standardisierten nichtparametrischen Test ANOVA und einem multiparametrischen Test MANOVA.

Die Resultate bestätigen eine bekannte Verlängerung aller Reaktionszeiten mit dem Alter, ohne Unterschied für beide Geschlechter. Der Vergleich zwischen der Kontrollphase A und den beiden Feldphasen B und C ergibt nur für die kontinuierliche Welle (Phase B) eine statistisch signifikante Verkürzung der Wahl-Reaktionszeit um weniger als 4 %.

Bei diesem Test wird die Reaktionszeit des Probanden auf die Worte "yes" oder "no" auf dem Computerbildschirm gemessen.

Gehlen et al. (1996) führen Untersuchungen der kognitiven Leistungen ohne und unter Exposition durch 900 MHz-GSM-Felder durch. Unter Verwendung eines 8 W-Handys im Abstand von 45 cm vom Kopf werden Grenzwertbedingungen nach DIN VDE 0848 mit ungestörten Feldstärken im Bereich des Kopfes von ca. 40 V/m simuliert. In zwei Versuchsgruppen mit 24 Probanden (12 männlich, 12 weiblich, 20-38 Jahre) und 28 Probanden (14 männlich, 14 weiblich, 20-34 Jahre) werden je eine Expositions- und eine Kontrollphase von jeweils 70 Min. Dauer in 2 Sitzungen in umgekehrter Reihenfolge hintereinander geschaltet. Während beider Phasen erfolgt eine computergestützte Überprüfung der

Aufmerksamkeitsleistung und ein manuell vorgenommener Test der Lern- und Merkfähigkeit. Der Aufmerksamkeitstest setzt sich aus Einzelprüfungen der Alertness (Reaktionsbereitschaft), der Vigilanz (Wachsamkeit) und einem Go/No Go-Test zusammen.

Bei tonischer Alertness wird mittels der Messung der Reaktionszeit auf einen visuellen Reiz mit und ohne akustischem Warnreiz die Steigerung und Aufrechterhaltung des Aufmerksamkeitsniveaus erfasst.

Die Vigilanz dient der Überprüfung der Aufmerksamkeit unter monotonen Bedingungen. Der Versuchsperson werden optische und akustische Reize dargeboten, wobei die Testperson eine bestimmte Abfolge und Qualität beider Reize erkennen und bestätigen soll.

Der Go/No Go-Test wird zur Überprüfung der Fähigkeit zur Unterdrückung von irrelevanten Reizen herangezogen. Dabei wird die Reaktionszeit auf vordefinierte optische Reize geprüft, die aus einer Fülle von Reiz-Darbietungen vom Probanden selektiv ausgesucht werden müssen.

Die Fähigkeit des gleichzeitigen Behaltens einer Information und die Verarbeitung neu angebotener Informationen zeichnet das so genannte Arbeitsgedächtnis aus. Die Prüfung erfolgt über die Darbietung verschiedener Bildmuster, wovon einige vorher gezeigte Muster von der Versuchsperson erkannt und per Tastendruck bestätigt werden sollen. Die jeweilige Reaktionszeit auf diese unterschiedlichen Reize stellt in den meisten Untersuchungen ein Bewertungskriterium dar.

Zur Prüfung des Gedächtnisses wird ein standardisierter auditiv-verbaler Lerntest (AVLT) herangezogen. Dabei soll der Proband 15 zuvor vom Versuchsleiter vorgelesene Substantive wiedergeben. Die Resultate der Einzelmessung werden pro Test und Gruppe ohne oder mit Exposition statistisch bewertet. Die Standardabweichung einzelner Kennwerte liegt zum Teil über 10 %. Dabei zeigt der Vergleich der Ergebnisse aus den Expositions- und Kontrollsitzen keine statistisch signifikanten Unterschiede.

Eine gemeinsame Bewertung aller fünf Studien bezüglich einer möglichen Wirkung hochfrequenter Felder des Alltags ist wegen recht unterschiedlicher Expositionsbedingungen problematisch.

Bei Gehlen et al. finden sich keine Befunde einer Einwirkung auf die kognitiven Funktionen. Wegen des Abstandes zwischen Kopf und Sendeanenne handelt es sich hier mehr um eine Exposition im Fernfeld, welches bekanntlich eine unterschiedliche Verteilung und niedrigere Maxima der SAR-Werte im Kopf als das Nahfeld aufbaut.

Die Exposition der Probanden mit einem 915 MHz-GSM-Feld führt bei Preece et al. zu einem statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Messgrößen mit und ohne Feld. Wegen der applizierten mittleren Leistung von nur etwa 0,125 W ist diese Exposition aber um einen Faktor 2 schwächer als sie bei den 900 MHz-GSM-Handys auftreten kann. Für die praxisorientierte Verwendung von Handys lässt sich deshalb aus dieser Studie keine Schlussfolgerung ableiten. Das gleiche gilt für die Felder der Basisstationen, die zwar um mehrere Zehnerpotenzen schwächer sind, dafür aber über längere Zeiträume einwirken.

Die Arbeiten von Preece et al. und Koivisto et al. zeigen übereinstimmend schwache Effekte einer kontinuierlichen Nahfeld-Welle mit einer Leistung von 1 W und einer GSM-modulierten Welle mit einer Leistung von 0,25 W auf die kognitiven Leistungen des ZNS. Diese Ergebnisse könnten so gedeutet werden, dass unabhängig von der Art der Modulation 900 MHz-Mikrowellen mit einer mittleren Leistung von über 0,25 W, direkt am Kopf appliziert, derartige Effekte produzieren können. Hypothetisch bietet sich für die Erklärung dieser Effekte eine schwache Erwärmung eines Gehirnteiles durch die Mikrowellen an, obwohl bisherige dosimetrische Untersuchungen keine nennenswerte Wärmeentwicklung für die 2 W-Handys bestätigen.

Die in zwei Studien übereinstimmend beobachtete Verkürzung der Reaktionszeit könnte auf den ersten Blick nicht als Beeinträchtigung, son-

dern vielmehr als Verbesserung der Leistungsfähigkeit des ZNS gedeutet werden. Solange aber die Wirkungsmechanismen dieser Effekte nicht geklärt sind, ist eine derartige Zuweisung nicht zulässig. Die Klärung der postulierten Effekte auf die kognitiven Funktionen des Zentralnervensystems muss ernsthaft beachtet und in weiteren gut kontrollierten Studien verifiziert oder falsifiziert werden. Geeignete Untersuchungen bei anderen als Mobilfunkfrequenzen stehen nicht zur Verfügung.

7.4 Einfluss auf das Verhalten in Tierexperimenten

Zu einer generellen Überprüfung der Existenz subtiler Effekte der Umwelt auf das Zentralnervensystem werden Untersuchungen des Verhaltens in Tierexperimenten vorgenommen. Die Tests erfolgen zumeist in einem mehrarmigen Labyrinth, wobei die Zeit vom Einlassen der Tiere bis zur Erledigung einer bestimmten Aufgabe gemessen wird. Den eigentlichen Untersuchungen wird eine Konditionierungsphase vorgeschaltet, in der die Tiere in der Erledigung der Aufgabe bzw. in der Auffindung von Fressen trainiert werden, bevor die eigentlichen Untersuchungen mit und ohne Feld vorgenommen werden.

Yamaguchi et al. (2003) testen Einflüsse von TDMA-Mobilfunkfelder auf die Lern- und Gedächtnisleistung von Ratten in einem T-Labyrinth mit Futterbelohnung. Die Ratten werden entweder eine Stunde täglich, 4 Tage oder 4 Wochen lang, ununterbrochen mit 1439 MHz Mikrowellen mit einer digitalen TDMA-Modulation exponiert. Die SAR im Gehirn beträgt 7,5 W/kg, wobei der mittlere Ganzkörperwert nur bei 1,7 W/kg liegt. Eine andere Gruppe wird SAR von 25 W/kg im Gehirn und SAR im Körper von 5,7 W/kg ausgesetzt. Die mit SAR von 25 W/kg an 4 Tagen exponierten Tiere zeigen eine statistisch signifikante Erniedrigung der Lern- und Gedächtnisleistung. Dieser Effekt ergibt sich nicht für Gehirn-SAR von 7,5 W/kg. Die Temperatur im Gehirn ist bei 25 W/kg erhöht, aber nicht bei 7 W/kg. Da die SAR bei der Nut-

zung von herkömmlichen Handys unter 2 W/kg liegt, erwarten die Autoren auch bei Menschen keinen Einfluss der Handyfelder auf die Lern- und Gedächtnisleistung.

Dubreuil et al. (2003) untersuchen die Wirkung des GSM 900 MHz-Mobilfunkfeldes auf das Gedächtnis von Ratten bei räumlichen und nicht räumlichen Aufgaben. Drei Gruppen von Tieren werden unterschiedlich trainiert. Die Schein- bzw. Feldexposition der Tiere erfolgt in einem Rohrkäfig, in dem nur die Köpfe der Tiere Mikrowellen mit SAR von 1 und 3,5 W/kg 45 Minuten lang ausgesetzt werden. Darüber hinaus bleibt eine Gruppe frei beweglich und ohne jegliche Behandlung. Der statistische Vergleich von Treffern und Fehlern in Abhängigkeit von der Anzahl der Trainingstage zeigt keinen Unterschied in der Leistung des Erkennungsgedächtnisse beim Vergleich von Kontrollen und den exponierten Tieren. Die Ergebnisse zeigen keine Evidenz für einen Effekt des GSM-900 MHz Mobilfunks auf das räumliche und nicht-räumliche Gedächtnis.

Dubreuil et al. (2002) testen, inwieweit 900 MHz GSM-Mobilfunkfelder die Ausführung von räumlichen Lernaufgaben bei 48 männlichen Ratten beeinflussen können. Die Exposition nur der Köpfe der Tiere erfolgt alternativ mit einer SAR von 1 oder 3,5 W/kg, jeweils 45 Minuten lang. Zur Überprüfung des Verhaltens werden zwei räumliche Lernaufgaben durchgeführt. Der statistische Vergleich der Leistungen zwischen den Käfig-Kontrollen, scheinexponierten Kontrollen und feldexponierten Tieren ergibt keinen signifikanten Unterschied.

Bornhausen et al. (2000) untersuchen die Wirkung von 900 MHz GSM-Mobilfunkfeldern auf das Verhalten der Ratten. Zwölf trächtige Ratten werden von Tag 1 bis 20 mit GSM-900 MHz bei einer Leistungsdichte von 0,1 mW/cm² ausgesetzt. Dies entspricht je nach der Größe des Tieres einer SAR zwischen 17,5 und 75 mW/kg. Parallel dazu wird eine gleichgroße Gruppe trächtiger Ratten ohne Exposition gehalten. Die Verhaltenstests werden nach einer Testphase an den 11 bis 12 Wochen alten Nachkommen durchgeführt. Die Analyse der Trefferfolgen lässt

keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Nachkommen der Kontrollen und der exponierten Tiere erkennen.

Lai et al. (1994) präsentieren eine Untersuchung des Verhaltens von männlichen Sprague-Dawley-Ratten in gepulsten 2,45 GHz-Mikrowellen (Pulsbreite 2 μ s, 500 Pulse/s). Die Leistungsdichte beträgt 1 mW/cm², die mittlere SAR 0,6 W/kg. In den Experimenten werden hungrige, mit einer Kochsalzlösung behandelte Tiere in einem sternförmigen 12-armigen Labyrinth ausgesetzt, wobei am Ende jedes Arms ein Stück Futter liegt. Als Beurteilungsmaß wird die Gesamtzeit herangezogen, die ein Tier benötigt, um alle 12 Futterstücke aufzufressen. In der 1. Phase werden die 8 Versuchstiere an die Prozedur gewöhnt. Die Gewöhnung besteht aus 45 Min. Aufenthalt im Wellenleiter ohne Feld und nachfolgend aus der Futtersuche im Labyrinth. Im eigentlichen Experiment werden die Tiere an 18 aufeinander folgenden Tagen einmal pro Tag 45 Min. scheinexponiert oder exponiert und dann in das Labyrinth hinausgelassen. Die erzielten Ergebnisse der Dauer der Futtersuche werden pro Tag statistisch bewertet.

Die Resultate zeigen, dass mit jedem Tag die zur Futtersuche notwendige Zeit bei exponierten wie auch bei scheinexponierten Tieren kürzer wird. Diese Ergebnisse belegen einen Lerneffekt. Dabei ist die benötigte Zeit der feldexponierten Tiere an allen 18 Versuchstagen statistisch signifikant höher als bei den Kontrolltieren, wenn die Ratten mit einer Kochsalzlösung vorbehandelt waren. Etwa vergleichbare Ergebnisse werden erzielt, wenn die Tiere mit Naloxon, mit dem die Wirkung von Opioiden neutralisiert wird, behandelt werden. Eine Vorbehandlung mit Naloxon und Physostigmin, das das cholinergische System inaktiviert, bewirkt dagegen keinen Unterschied im Lerneffekt zwischen den feldexponierten und den Kontrolltieren. Aus den Ergebnissen leiten die Autoren die Schlussfolgerung ab, dass die Mikrowellen ein Verhaltensdefizit im Arbeitsgedächtnis der Tiere verursachen. Dieses Defizit kann aufgehoben werden, wenn Physostigmin oder Naloxon als Vorbehandlung verabreicht werden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das applizierte Feld gleichzeitig in

den cholinergischen wie auch endogenen Opioiden auf das Neurotransmitter-System einwirkt.

Die Tierexperimente zeigen übereinstimmend Effekte der starken Mikrowellen auf das Verhalten und die Lernfähigkeit der Tiere. Insbesondere Tests mit operativer Konditionierung liefern in Tierexperimenten verlässliche Resultate, da hier im Gegensatz zu den Probanden die mentale Komponente nicht zum Tragen kommt. Es muss deshalb unter den gegebenen Feldverhältnissen von einer realen Beeinflussung des ZNS bei den untersuchten Tieren ausgegangen werden.

Wie unterschiedliche Modellbetrachtungen fast übereinstimmend zeigen, liegt die maximale Erwärmung im menschlichen Kopf im Bereich von 0,1 °C. Eine derart schwache Erwärmung wird ohne Folge für die Funktion des ZNS ausreguliert. Wegen einer unterschiedlichen Absorption des tierischen Körpers kann hier die Erwärmung wesentlich höher ausfallen und könnte bestimmte Verhaltensänderungen zur Folge haben.

Die Ergebnisse der Verhaltensbeeinträchtigung durch Mikrowellen bei Ratten lassen sich auf keine praktische Situation der Exposition des Menschen durch die Felder der Mobilfunkanlagen im D-Netz übertragen.

Die Möglichkeit, mit Tierexperimenten pharmakologisch verschiedene Systeme des ZNS selektiv zu hemmen, liefert zusätzlich einen exzellenten Weg, den Ort der Wirkung zu überprüfen. Hier stellt sich die Frage, inwieweit diese Ergebnisse auf den Menschen in einer Alltagssituation übertragbar sind.

Die Tiere werden in den beschriebenen Experimenten relativ lange mit 2,45 GHz-Mikrowellen mit einer Leistungsdichte um 1 mW/cm² exponiert. Ähnliche Leistungsdichten werden im Kopfbereich des Menschen bei Verwendung von Handys aufgebaut, wobei die Expositionszeiten wesentlich kürzer sind. Allerdings handelt es sich bei der Benutzung eines Handys um ein Nahfeld, wohingegen die Tiere einem Fernfeld ausgesetzt sind. Der gravierendste Unterschied ist wahrscheinlich in der im Kopf des Menschen

und im Körper der Ratten bei 1 mW/cm² Leistungsdichte aufgenommenen Leistung zu suchen. Wegen der kleinen Abmessungen des Rattenkörpers und insbesondere des Rattenkopfes wird hier bei einer Exposition mit 1 mW/cm² eine wesentlich höhere SAR auftreten. Es muss davon ausgegangen werden, dass die applizierte Leistungsdichte einen Wärmestress auslöst. Die Verhaltenstendenzen der Tiere sprechen ebenfalls für diese Hypothese.

7.5 Einfluss hochfrequenter Felder auf den menschlichen Schlaf

Die Studie "Gesundheitliche Auswirkungen des Kurzwellensenders Schwarzenburg" (Schwarzenburg-Studie) im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft (1995) hat die Frage nach einer eventuellen Beeinträchtigung des Schlafes durch die hochfrequenten Felder aufgeworfen.

Zur Aufrechterhaltung der körperlichen und geistigen Leistungsfähigkeit braucht der Körper einen regelmäßigen Schlaf. In dem vegetativ gesteuerten zirkadianen 24-Stunden-Rhythmus fallen der Schlafphase 5-8 Std. bei Erwachsenen und bis zu 18 Std. bei Säuglingen zu.

Eine der Voraussetzungen für einen gesunden Schlaf ist eine geregelte Lebensweise. Ihre Einhaltung ist jedoch keine Garantie für einen erholsamen Schlaf. Schlafstörungen können auch andere vielfältige Ursachen haben. Psychische Belastung wie Stress, übermäßige Erregung und Sorgen sind hierfür die häufigsten Ursachen. Sie können aber auch durch verschiedene Umweltfaktoren wie z. B. Lärm ausgelöst werden. Wegen ihrer multifaktorellen Abhängigkeit sind die Ursachenfindung sowie die Diagnose nicht eindeutig, so dass ein beträchtlicher Interpretationsraum bleibt. In der jüngsten Zeit werden unspezifische Symptome, zu denen auch Schlafstörungen zählen, häufig mit den Einwirkungen elektromagnetischer Felder in Zusammenhang gebracht. Wegen der starken psychischen Komponente von Schlafstörungen könnte bereits die Angst der breiten Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern die Schlafstörungen potenzieren. Gerade wegen der

ren. Gerade wegen der flächendeckenden Versorgung mit Mobilfunkanlagen mit neuartigen elektromagnetischen Feldern scheint eine Überprüfung dieser Hypothese in zugeschnittenen Schlafuntersuchungen angezeigt.

Der Schlaf äußert sich charakteristisch in Veränderungen verschiedener physiologischer Größen. So werden z. B. die Körpertemperatur und die Herz- und Atemfrequenz während des Schlafes autonom herabgesenkt. Die beste objektive Möglichkeit zur Überprüfung der Qualität und Länge des Schlafes bietet die Aufnahme der elektrischen Aktivität des Gehirns, das Elektroenzephalogramm (EEG). Während des Schlafes wird die Aktivierung und Leistung des ZNS stark gesenkt, wodurch sich im EEG spezifische Schlafmuster des orthodoxen Schlafes sowie der sog. REM- (Rapid Eye Movement) Phase unterscheiden lassen. Die orthodoxe Phase mit etwa 80 % der Dauer des gesamten Schlafes dient primär der Körpererholung, wohingegen die REM-Phase mit den restlichen 20 % des Schlafes mit der Verarbeitung der Gefühls- und Triebkomponenten, der Tagesreste und einem Vergleich mit früherem Material in Verbindung gebracht wird.

Für die Aufzeichnung des EEG wird von definierten Stellen an der Kopfoberfläche (zumeist nach dem international standardisierte System 10/20) die elektrische Aktivität abgeleitet. In den nachfolgenden Bewertungsschritten werden die einzelnen Zeitsignale einer Spektral-Analyse (häufig FFT) und dann einer frequenzmäßigen Einteilung in so genannte α , β , δ und γ -Bänder unterzogen. Die mittlere Leistungsdichte pro Ableitung und Band stellt die Kenngrößen des EEG dar, die weiterhin statistisch verglichen werden. Die wegen der Nichtstationarität des EEG-Signals nur kurzen Abschnitte von jeweils wenigen Minuten Dauer sollen zusammenhängend bearbeitet werden.

Wagner et al. (2000) führen Untersuchungen über den Einfluss eines mit 217 Hz und 577 μ s Pulsdauer modulierten 900 MHz-Feldes auf das Schlafverhalten von 20 gesunden Probanden im Alter zwischen 19 und 36 Jahren durch.

Das Feld mit einer Leistungsdichte von 50 W/m² wird von einer Antenne aufgebaut, die sich 40 cm unter dem Kopfkissen befindet. Die erzeugte maximale SAR wird auf 364 mW/kg pro 10 W/m² Leistungsdichte geschätzt.

Die Untersuchung wird in 2 Sektionen in je 3 aufeinander folgenden Nächten durchgeführt, wobei zwischen den Sektionen mindestens 7 Tage vergehen. In Blindstudien bezüglich der Exposition und Scheinexposition werden in der Schlafperiode jeweils zwischen 23.00 Uhr und 7.00 Uhr polysomnographische Aufnahmen von EEG, EOG und EMG vorgenommen. Die EEG-Aufnahme und -Bewertung erfolgt nach internationalem Standard, die Ergebnisse werden mit dem ANOVA-Verfahren statistisch bewertet. Als Schlaf-Parameter werden 10 aus dem EEG abgeleitete Parameter wie z.B. Schlafdauer, Einschlafverzögerung, Index der Schlafeffizienz, Anzahl von REM-Phasen bzw. REM-Verzögerung, Anzahl der Wachphasen, etc., ausgewählt. Die statistische Bewertung dieser Schlaf-Kennwerte und ein individueller und interindividueller Vergleich zwischen den Kontroll- und Expositionsphasen ergibt keinen statistisch signifikanten Unterschied.

Eine Untersuchung über die Einwirkung von Mobilfunkfeldern auf die Qualität des menschlichen Schlafes wird von **Fritzer et al. (2000)** präsentiert. Dazu werden 20 Probanden für je 8 Nächte einbestellt und randomisiert in eine Kontroll- und eine Feldgruppe mit je 10 Personen unterteilt. Die feldexponierte Gruppe wird 7 Nächte lang einem 900 MHz-GSM-Feld ausgesetzt. Die Antenne befindet sich 30 cm entfernt, die verwendete Leistung des Feldes wird im ersten Bericht als weit unterhalb des Basiswertes von 2 W/kg angegeben. Die genaue Stärke soll in weiteren Messungen genau bestimmt werden. Als Probanden werden körperlich und psychisch gesunde Männer im Alter zwischen 20 und 50 Jahren rekrutiert. Starkes Rauchen, chronischer Alkoholkonsum, Einnahme von Drogen oder psychotropen Substanzen gelten als Ausschlusskriterien. Weiterhin erfolgt im Vorfeld eine internistische, neurologische sowie psychiatrische Untersuchung der Probanden. In der Schlafphase zwischen 23.00 Uhr und 7.00 Uhr

(Weckzeit) werden von standardisierten Stellen des Kopfes 15 EEGs abgeleitet, des Weiteren werden die Probanden psychologischen Tests unterzogen. Als Schlafparameter werden registriert: Bettzeit, totale Schlafzeit, Schlafeffizienz, Schlaflatenz, REM-Latenz, prozentualer Anteil der einzelnen Schlafstadien, Dauer der einzelnen Stadien, REM-Dichte und Häufigkeit des Auftretens der einzelnen REM-Phasen. Die Bewertung richtet sich nach den Auswertrichtlinien von Rechtschaffen und Kales. Die bisher erfolgte Auswertung ergibt weder für die aus dem EEG abgeleiteten Parameter noch für die Ergebnisse der testphysiologischen/psychologischen Verfahren einen signifikanten Unterschied zwischen der Expositions- und der Kontrollgruppe.

Borbély et al. (1999) führen Untersuchungen zur Beeinflussung des Schlafes durch 900 MHz-GSM-Felder an jungen Probanden durch. Für die Untersuchung werden 24 Probanden im Alter zwischen 20 und 25 Jahren (Durchschnittsalter 22,6 Jahre) ausgewählt, die nicht an Schlafstörungen leiden und weder Koffein noch Alkohol konsumieren. Das 900 MHz-Pseudo-GSM-Feld ist linear polarisiert und im Bereich des Bettes mit 3 $\lambda/2$ -Dipol-Antennen im Abstand vom 30 cm vom Kopf entfernt aufgebaut. In der Expositionsphase wird das Feld abwechselnd für 15 Min. ein- und ausgeschaltet. Die maximale Leistungsdichte im Kopfbereich wird auf 1 W/kg über 10 g Masse geschätzt. Für die Bewertung des Schlafes werden das EEG in mehreren Standard-Ableitungen, das EMG und das EOG herangezogen. Für die EEG-Analyse werden 20 Sek. dauernde Abschnitte mit der FFT-Routine bewertet und in Bänder aufgeteilt. Die statistische Bewertung und der Vergleich erfolgen mit Wilcoxon- und ANOVA-Tests. Die Probanden werden in zwei aufeinander folgenden Nächten untersucht, wobei nur eine dieser Nächte nach zufälliger Auswahl mit den Feldexpositionen verbunden ist. Die Ergebnisse zeigen eine statistisch signifikante Verkürzung der Wachtraumphase von 18 auf 12 Min. unter der Einwirkung der Felder. In der Schlafphase ohne REM-Schlaf zeichnet sich ein Anstieg der mittleren Leistungsdichte insbesondere im EEG-Frequenzband zwischen 7,25 und 14,25 Hz ab. Die Auto-

ren interpretieren das Ergebnis mit einer Verbesserung der Schlafqualität durch die Einwirkung der Mobilfunkfelder.

Wagner, Röschke, Mann et al. (1998) versuchen, eigene Experimente zur Überprüfung des Einflusses der Mobilfunkfelder auf die Schlafabläufe zu reproduzieren. 24 gesunde und an keiner Schlafstörung leidende Probanden im Alter zwischen 18 und 37 Jahren werden für diese Untersuchung herangezogen. Das Bett steht in einer Expositions-kammer, wo eine Befeldung mit kreispolarisierter logarithmischer periodischer Flachantenne im Bereich des Kopfes ein GSM-900 MHz-Feld mit einer Leistungsdichte von 20 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (0,2 W/m^2) aufbaut. Die SAR im Bereich des Kopfes wird auf 0,3 W/kg als Mittelwert und 0,6 W/kg als Maximalwert geschätzt. Der Versuchsablauf gleicht den Untersuchungen von Mann und Röschke (1996). Zur Beurteilung der Schlafqualität und -quantität werden die Standard-Ableitungen des EEG mit der FFT (Fast-Fourier-Transformation) in α , β , δ und γ -Bänder aufgeteilt und deren mittlere Leistungen herangezogen. Die statistische Bewertung erfolgt mit Wilcoxon- und ANOVA-Tests.

10 unterschiedliche Schlafparameter werden ausgearbeitet und zwischen Feld- und Kontrollphase verglichen. Im Gegensatz zu den ersten Untersuchungen ergeben die Resultate bezüglich der Latenz des Einschlafens und der REM-Dauer keine statistisch signifikanten Differenzen. Damit können die Ergebnisse der ersten eigenen Untersuchung (1996) in einem doppelt so großen Kollektiv von Probanden nicht bestätigt werden.

Mann und Röschke (1996) führen eine Untersuchung des Schlafes an 12 Probanden im Alter zwischen 21 und 34 Jahren zur Überprüfung der Beeinflussung des Schlafes durch 900 MHz-GSM-Felder durch. Jeder der Probanden verbringt 3 sukzessive Nächte im Schlaflabor. Neben dem EEG wird bei den Probanden auch ein EOG (Elektrookulogramm) und EMG (Elektromyogramm) kontinuierlich zur Erkennung von Artefakten abgeleitet und abgespeichert.

Die Exposition erfolgt mit einem 8 W-Handy, dessen Antenne 40 cm vom Kopf entfernt angeordnet ist. Die ungestörte Leistungsdichte im Bereich des Kopfes beträgt $50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ($0,5 \text{ W}/\text{m}^2$). Von den 3 Nächten dient die erste zur Adaptation, die nachfolgenden 2 Nächte verbringen die Versuchspersonen randomisiert mit oder ohne Feld, in denen sie von 23.00 Uhr an 8 Std. lang durch eine kontinuierlicher EEG-Aufnahme überwacht werden. Die Ergebnisse werden mit dem Wilcoxon-Test für gepaarte Proben bewertet. Von den 15 ausgearbeiteten Beurteilungskriterien für Schlafqualität und Schlafquantität haben sich beim Vergleich zwischen Kontroll- und Feldphase in drei Größen signifikante Unterschiede ergeben. Unter der Einwirkung des Feldes verkürzt sich die Latenz zum Schlafbeginn statistisch signifikant ($p < 0.005$) um 23 %. Mit einer geringeren statistischen Sicherheit ($p < 0.05$) ergibt sich eine ca. 18 %-ige Verkürzung der REM-Phase und eine 6 %-ige Herabsetzung der mittleren Leistungsdichte im α -Band während der REM-Phase. Die Probanden geben zwar keine Verschlechterung der Schlafwahrnehmung zu Protokoll, die subjektiven Parameter deuten jedoch auf eine signifikante ($p < 0.05$), etwa 18 %-ige Erhöhung der Gemütsunruhe in den nachfolgenden Tagen.

Die Ergebnisse müssen unter dem Gesichtspunkt der niedrigen Anzahl von Probanden und relativ großer Schwankungen in den verschiedenen Schlafparametern sehr vorsichtig gedeutet werden. Primär ist auf dieser Grundlage eine weitere vergleichende Untersuchung erforderlich.

Im Vordergrund des Interesses der durchgeführten Laboruntersuchungen mit Probanden stehen die Wirkungen der Fernfelder von Basisstationen auf den Schlaf. Im Vergleich zu den Leistungsdichten der Basisstationen im Alltag sind die in den Experimenten angewandten Felder zum Teil beträchtlich stärker. Alle bisher durchgeführten Studien zur Überprüfung eines eventuellen Einflusses der Mobilfunkfelder auf den menschlichen Schlaf werden, gemessen an der Subtilität der Veränderungen und der Variabilität aller Schlafparameter, in relativ kleinen Gruppen durchgeführt. Die Ergebnisse der bisherigen

Studien sind auch nicht konsistent. Einige Untersuchungsergebnisse könnten durchweg als eine positive Einflussnahme der Mikrowellen auf den Schlaf gedeutet werden. Allerdings können die berichteten Untersuchungsergebnisse bei zwei Replikationen eigener Untersuchungen (Wagner et al., 1998 und 2000) nicht bestätigt werden. Damit stellt sich die Frage, in wie weit überhaupt eventuelle subtile Effekte der Mikrowellen bei der großen Breite und Variation des Schlafgeschehens verlässlich ermittelt werden können und welchen Stellenwert sie tatsächlich für die Gesundheit haben.

Wegen der Bedeutung des Schlafes für die körperliche und psychische Regeneration einerseits und der Langzeit-Exposition des Menschen durch die Felder der Basisstationen andererseits sind weitere klärende Untersuchungen notwendig. Dabei müssten auch die im Alltag dominanten Rundfunk- und Fernsehwellen berücksichtigt werden.

7.6 EEG unter der Einwirkung von Mikrowellen

Obwohl dem EEG eine sehr niedrige Spezifität und Sensitivität bezüglich des Nachweises einer pathologischen Veränderung des Zentralnervensystems im Wachzustand zugesprochen wird, wird in einer Reihe von Tierexperimenten und Untersuchungen mit Probanden die Analyse des EEG zur Beeinflussung eines eventuellen Einflusses von Mikrowellen herangezogen.

Croft et al. (2002) verfolgen den Einfluss von GSM 900 MHz-Mobilfunkfeldern auf das Verhalten, das EEG und die akustisch evozierten Potentiale (AEP) bei 24 Probanden. Die geschätzte mittlere Leistung liegt zwischen 3 und 4 mW. Die Probanden im Alter zwischen 19 und 48 Jahren (Mittelwert 27,5) haben keine akustischen Defizite oder neurologische Erkrankungen. Die Exposition der Probanden mit Mikrowellen erfolgt mittels eines Handys, das in einer Entfernung von 5 cm vom Kopf angebracht ist. Eine Messung der Emission wird nicht vorgenommen, die geschätzte mittlere Leistung liegt bei 3 bis

4 mW. EEG, AEP, die Reaktionszeit und Reaktionsgenauigkeit sowie die Ausführung von Diskriminationsaufgaben wurden ohne und mit Feld vorgenommen. Aus der Exposition mit dem Mobilfunkfeld resultiert eine Veränderung des Ruhe-EEG, indem die Aktivität der rechten Hemisphäre im Frequenzbereich zwischen 1 und 4 Hz erniedrigt und im Frequenzband 8 bis 12 Hz schwach erhöht ist. Der Vergleich der AEP-Kurven und ihrer Frequenzspektren lässt auch für die AEP eine Veränderung im Band zwischen 30 und 45 Hz erkennen. Allerdings fehlt in der Arbeit die Angabe der normalen Variabilität der betrachteten Größen, so dass das Ausmaß der feldbedingten Veränderungen nicht eingeschätzt werden kann.

Beason et al (2002) exponieren Neuronen, entnommen aus dem Gehirn von 34 erwachsenen Finken, mit GSM 900 MHz-Mobilfunkfeldern. Vor, während und nach der Exposition wird die Feuerrate der Neuronen in insgesamt 133 Intervallen gemessen. Jedes Intervall besteht aus einer 10-minütigen Ruheperiode. Bei mehr als 50 % der Neuronen ändert sich die Feuerrate während der Exposition, die Änderung bleibt auch nach der Exposition bestehen. Ob und wann sich die Aktivität erholt, ist nicht in der Arbeit aufgeführt. Mehr als 76 % der auf die Mikrowellen reagierende Zellen antworten im Durchschnitt mit einer 3,5 fachen Erhöhung der Aktivitätsfrequenz, in dem Rest (24 %) kommt es im Mittel zu einer 2,5-fachen Erniedrigung der Aktivität. Die Autoren leiten von diesem Ergebnis eine potentielle Gefahr für die Nutzer von Mobilfunk ab.

Krause et al. (2000) führen Untersuchungen des Einflusses von GSM-Handys auf das EEG während eines Gedächtnistests durch. Die von einem Computer gesteuerten Handys werden etwa 20 mm vom Kopf entfernt positioniert und mit einem 902 MHz-GSM-Feld betrieben. Die mittlere Leistung beträgt 0,25 W. Zur Untersuchung werden 16 gesunde rechtshändige erwachsene Probanden (8 männlich, 8 weiblich) im Durchschnittsalter von 23 Jahren herangezogen. In einem Gedächtnis-Paradigma werden den Probanden 24 Verben angeboten, wovon 4 richtig erkannt werden sollen. Gleichzeitig erfolgt

die Aufnahme des EOG und des EEG. Je 7 EEG-Ableitungen werden von der rechten Hemisphäre und 7 von der linken Hemisphäre des Gehirns abgeleitet. Innerhalb von 1 Std. erfolgen 192 Gedächtnis-Tests, wobei für je 30 Min. das Feld ein- bzw. ausgeschaltet wird. Für die einzelnen Frequenzbänder des EEG wird die Leistungsdichte bestimmt und mit dem ANOVA-Test analysiert. Die Feldexposition führt zu einer Erhöhung der EEG-Leistungsdichte während der Ausführung des Gedächtnistests. Dieser Effekt manifestiert sich am deutlichsten in dem unteren α -Band zwischen 8 und 10 Hz, wo eine statistisch signifikante Erhöhung der relativen Leistungsdichte während der Exposition festgestellt wird.

Freude et al. (2000) überprüfen eigene frühere Ergebnisse über die Wirkung der von GSM-Handys ausgehenden Mikrowellen auf die langsamen Potentiale des EEG bei Probanden. 20 gesunde Probanden im Alter zwischen 21 und 30 Jahren führen komplexe und anspruchsvolle Aufgaben unter dem visuellen Monitoring (VMT) durch. Während der Tests werden Probanden über ein Handy auf der linken Kopfseite mit 916,2 MHz-Mikrowellen und GSM-Modulation sowie einer mittleren Leistung von 350 mW im Doppelblindversuch schein- oder feldexponiert. Die Beurteilung der Leistung unterschiedlicher Reaktionszeiten wird ermittelt. Darüber hinaus erfolgt eine kontinuierliche Aufnahme des EEG von 30 Standardpositionen sowie des EOG. In einem weiteren Verfahren werden diese Signale gefiltert und testsynchron gemittelt, um aus dem EEG Bereitschaftspotentiale und langsame Antwortpotentiale zu erhalten. Die statistische Analyse bestätigt keine signifikanten Unterschiede für das VMT. Langsame Antwortpotentiale zeigen eine Reduktion der negativen Verschiebung unter der Feldeinwirkung. Die Autoren leiten von diesem Resultat einen Effekt der Mikrowellen auf eine bestimmte Stufe der Informationsverarbeitung im Gehirn ab.

Daraus können jedoch keine Rückschlüsse auf die Beeinflussung des Wohlbefindens und der Gesundheit abgeleitet werden.

Freude et al. (1998) unterziehen 16 gesunde rechtshändige männliche Versuchspersonen im Alter zwischen 21 und 36 Jahren unter der Einwirkung von 916,2 MHz-GSM-Feldern zwei unterschiedlichen psychologischen Tests. Die auf der linken Kopfseite befestigten Handy-Phantome senden im eingeschalteten Zustand eine Spitzenleistung von 2,8 W, woraus eine SAR von 1,42 mW/g bei Mittelung über 1 g und 0,882 mW/g bei Mittelung über 10 g Gewebe ermittelt wird. In den Kontroll- und Feldphasen wird vom Kopf des jeweiligen Probanden das EEG in 30 Ableitungen nach dem international erweiterten 10/20-System aufgenommen. Für die Detektion der Augenbewegungen erfolgt eine kontinuierliche Registrierung des Elektrookulogramms (EOG) in vertikaler und horizontaler Ebene.

In jeder Kontroll- und Feldphase führen die Probanden Experimente zur Erzeugung von EEG-Bereitschaftspotentialen und Aufgaben mit visuellem Monitoring durch. Die Bereitschaftspotentiale werden mit einer schnellen 30-fachen Betätigung einer Maustaste durch den rechten Zeigefinger erzeugt. Bei der visuellen Monitoring-Aufgabe erfolgen jeweils 50 Versuche mit einer schnellen dreistufigen Bewegung des Pointers auf dem Bildschirm gegen den Uhrzeigersinn, um eine definierte Position eines Punktes möglichst schnell und genau zu erreichen. In der statistischen Bewertung werden die Werte mit und ohne Feld unter Anwendung des ANOVA-Modells verglichen. In der einfachen Finger-Bewegungsaufgabe ergibt sich keine signifikante Feldwirkung auf die Bereitschaftspotentiale. Dagegen zeigen sich statistisch signifikante Differenzen in langsamen Hirnpotentialen beim visuellen Monitoring-Test, indem die mittlere Amplitude der langsamen Hirnpotentiale unter der Feldwirkung verringert wird. Diese Veränderung macht sich in der zentralen und temporo-parieto-occipitalen Hirnregion, aber nicht in der frontalen Region bemerkbar. Die bekannte akustische Hörwahrnehmung in Mikrowellen wird von den Autoren wegen der niedrigen Leistung des applizierten Feldes als Ursache für diese Effekte ausgeschlossen.

Eulitz et al. (1998) präsentieren Untersuchungen mit 13 gesunden männlichen Versuchspersonen im Alter zwischen 21 und 27 Jahren mit und ohne Einwirkung von 916,2 MHz-GSM-Feldern auf die Akustisch Evozierten Potentiale (AEP). Ein Handy-Phantom wird in der typischen Lage an der linken Seite des Kopfes befestigt, wobei im eingeschalteten Zustand eine maximale Leistung von 2,8 W gesendet wird. Während der Untersuchung in der Kontroll- wie auch in der Feldphase wird das EEG der Probanden von 30 Lokalisationen auf der Kopfoberfläche nach dem international erweiterten 10/20-System kontinuierlich aufgenommen. Horizontale und vertikale Augenbewegungen werden mittels EOG registriert und zur Artefakterkennung herangezogen. Den Probanden werden je 450 Stimuli unter einseitig blinden Bedingungen angeboten. Als Reiz dienen Töne von 1000 und 2000 Hz, wobei das Stimulus-Intervall von 2 Sek. eingehalten wird. Die EEG-Antworten der linken und rechten Hemisphäre auf einzelne akustische Stimuli werden gemittelt und einer verfeinerten Leistungsspektrum-Analyse der PE-300-Komponente unterzogen. Für den statistischen Vergleich kommt die ANOVA-Methode zum Einsatz. Die Ergebnisse der gemittelten EEG-Antworten auf akustische Reize (AEP) zeigen keine Abhängigkeit der Feldeinwirkung auf die Verläufe. Ein Effekt ist in der linken Hemisphäre erkennbar, und zwar nur in Kombination mit dem Reiz. Die größte Differenz zeigt sich in den Ableitungen CZ und C3. Als Schlussfolgerung wird abgeleitet, dass die durch das Feld induzierte Gehirnaktivitätsveränderung durch die akustisch evozierten Potentiale modifiziert wird, und nicht umgekehrt. Die möglichen Konsequenzen dieses Befundes für die ZNS-Verarbeitung werden als schwer einschätzbar dargestellt.

Röschke und Mann (1997) stellen vergleichende Untersuchungen an 34 gesunden männlichen Probanden im Alter zwischen 21 und 35 Jahren mit und ohne Exposition durch Mikrowellen an. In den Vormittagsstunden werden bei jedem Probanden 2 jeweils 10-minütige EEG-Aufnahmen mit einer 30-minütigen Pause zwischen den beiden Aufnahmen durchgeführt. Es werden jeweils 2 EEG-Ableitungen, und zwar C3/C4 und A1/A2 nach dem internationalen

10/20-System registriert. Jede EEG-Aufnahme wird in 3 aufeinander folgende Segmente, bestehend aus 80 Scharen mit je 2,55 Sek. Dauer eingeteilt. Das 1. und 3. Segment dient der Vigilanzkontrolle. Je 80 Spektren werden gemittelt und für die EEG-Bänder α , β , δ und γ die mittlere Leistungsdichte berechnet.

Weitere statistische Analysen erfolgen mit den Wilcoxon-, Kolmogorow- und Smirnow-Tests. Die Resultate ergeben keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den mittleren Leistungsdichten in den EEG-Bändern mit und ohne Kurzzeit-Exposition.

Eine den abgesteckten Rahmen sprengende, aber im deutschsprachigen Raum kontrovers diskutierte Arbeit von **L. von Klitzing (1995)** baut auf der Aufnahme und Bewertung des EEG auf. Dabei wird die Wirkung einer 150 MHz-Welle mit einer 212 Hz-Pulsmodulation auf das EEG von 17 Probanden untersucht. Das Alter der Versuchsprobanden liegt zwischen 20 und 29 Jahren. Das applizierte Nahfeld wird im Bereich des Nackens mit einer Spule erzeugt, wobei die magnetische Flussdichte etwa $1 \mu\text{T}$ betragen soll. Für das Feld in 6 cm Tiefe im Gehirn wird eine Leistungsdichte kleiner als $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ($0,01 \text{ W}/\text{m}^2$) angegeben. Die Probanden liegen während der Untersuchung mit geschlossenen Augen, ihr Wachzustand wird über die periodische Betätigung einer Kontrolltaste überprüft. Innerhalb der nicht näher definierten Untersuchungszeit wird das Feld 2-3 mal für Probanden blind jeweils 15 Min. eingeschaltet. Zur Überprüfung des Feldeinflusses wird das EEG von der standardisierten Lokalisation O1/O2 respektive P3/P4 abgeleitet und der Fast-Fourier-Transformation unterzogen.

Die Spektren werden visuell verglichen, die Arbeit beinhaltet keine Angaben über eine statistische Bewertung und die dabei erzielten Resultate. Exemplarisch werden nur einige Verläufe der Leistungsdichte jeweils aus der 1. und 2. Kontroll- und Feldphase präsentiert. Aus der Beschreibung geht nicht hervor, ob diese Aufzeichnungen von der gleichen Versuchsperson stammen oder ob sie beliebig zusammengesetzt wurden. Die Aufzeichnungen der spektralen

Leistungsdichte für kurze Intervalle, jeweils verglichen aus einer Kontroll- und einer nachfolgenden Feldphase, weisen ähnliche Verläufe mit unterschiedlicher Amplitude der Leistungsdichte auf. Die Verläufe der Spektraldichte aus der ersten Kontroll- und Feldphase sind mit der darauf folgenden Kontroll- und Feldphase nicht vergleichbar.

Trotzdem wird vom Autor die Hypothese aufgestellt, dass die Feldexposition die intrazelluläre Kommunikation im ZNS durch die niederfrequente Umhüllende des hochfrequenten Signals beeinflusst. Die präsentierten Daten liefern jedoch keine nachvollziehbare Grundlage für eine derartige Behauptung.

Das spontane EEG des Menschen im Wachzustand wird als unspezifisch für die Beurteilung einer Einflussnahme oder krankhafte Veränderung im Zentralnervensystem eingestuft. Unterschiedliche Vigilanz-Stufen, Lidschlag etc. verändern maßgeblich, häufig nur temporär, die zeitlichen Verläufe des EEG. Die Spektralanalyse mittelt die Frequenzinhalte über ein bestimmtes Intervall, wodurch derartige Artefakte im Verlauf der Leistungsdichte markiert werden können.

Die Spezifität und Sensitivität des EEG wird durch die EEG-Mittlung der Reiz- oder Verarbeitungsantworten deutlich erhöht.

Einige Studien mit diesem Design haben eine schwache Beeinflussung evozierter Potentiale (EP) durch die hochfrequenten Felder der Handys gezeigt. Inwieweit diese subtile Veränderung durch eine geringe Erwärmung mittels Mikrowellen zu Stande kommt, ist ungewiss.

Die Bedeutung dieser Effekte für die Funktion des ZNS ist ebenfalls schwer einzuschätzen. Weitere Untersuchungen müssen diese Effekte erläutern, bevor in zugeschnittenen Experimenten deren Bedeutung und Wirkungsmechanismen nachgegangen werden kann.

7.7 Kalziumhaushalt des Hirngewebes

Das Kalzium spielt eine bedeutende Rolle in der Physiologie aller erregbaren Zellen. Im Zentralnervensystem beeinflussen die Kalzium-Ionen die elektrophysiologischen und biophysikalischen Eigenschaften der Zellmembranen von Neuronen,

- vermitteln und modulieren die Freigabe der Neurotransmitter aus präsynaptischen Nervenendigungen und
- sind stark beteiligt am Hirn-Energie-Metabolismus, sowie an Regulation und Funktionalität der Blut-Hirn-Schranke.

Es ist anzunehmen, dass der Kalziumhaushalt auch von der Entstehung und Entwicklung von Krankheiten betroffen ist. Deshalb haben die ersten Meldungen über die Einflussnahme von Mikrowellen auf den Kalziumhaushalt in der Zelle in den 70er Jahren für große Aufregung gesorgt. Stellvertretend für zahlreiche, sich gegenseitig bestätigende Studien aus dieser Zeit werden hier einige Studien exemplarisch präsentiert und diskutiert, obwohl sie sich von den Feldern der Mobilfunkanlagen und anderen hochfrequenten Quellen im Alltag in der Frequenz oder Modulation stark unterscheiden.

Diese Beobachtungen werden im Prinzip durch die Publikation von **Kittel et al. (1996)** gestützt. Eine in vivo-Exposition von Mäusen mit 2,45 GHz-Mikrowellen, sinusförmig mit 16 Hz moduliert, mit einer SAR von 2 mW/g, lässt mikroskopisch betrachtet eine Reduktion der Zahl von Kalzium enthaltenden Verikeln in den Neuronen und eine Erhöhung der Kalzium-Ionen auf der Zelloberfläche erkennen.

Alle Arbeiten verwenden eine veraltete Messmethode des Kalziumausflusses aus der Zelle mittels radioaktiver Markierung der Kalzium-Ionen. Da die Kalziumkonzentration außerhalb der Zelle generell um bis zu 4 Zehnerpotenzen höher ist als die Konzentration im Zellinneren, können kleine Reste des extrazellulären Kalziums bei der Messung große Fehler verursachen. Neuere Fluoreszenzmethoden beschreiben direkt die

Kalziumkonzentration in der Zelle. Leider liegen keine Replikationen der zuerst von den Gruppen um Adey und Bawin im Hirngewebe ermittelten Einflüsse hochfrequenter Felder auf den Kalzium-Ausfluss unter der Anwendung der aussagekräftigeren Fluoreszenzmethode vor.

7.8 Blut-Hirn-Schranke

Die Blut-Hirn-Schranke ist eine hoch spezialisierte und spezifische Barriere, deren Durchlässigkeit für verschiedene Stoffe wahrscheinlich durch Protein-Rezeptoren wie Zonulin oder Zot gesteuert wird. Auch für kleine Moleküle ist die Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke sehr unterschiedlich und sie zeigt beim Menschen sehr große interindividuelle Schwankungen.

Manche Stoffe im Blutplasma erreichen unter physiologischen Bedingungen die interzellulären Spalten des Gehirns nicht. Von dieser Tatsache wird die Existenz einer Blut-Hirn-Schranke abgeleitet, die wahrscheinlich auf Grund einer speziellen Ausgestaltung der Wand der Hirnkapillaren unter Steuerung der Neuroglia diese Filterfunktion ausübt. Eine Veränderung der Durchlässigkeit dieser Schranken führt eine vielseitige Beeinträchtigung des ZNS mit sich. Verschiedene Erkrankungen wie Multiple Sklerose, Hirntumor, Parkinsonsche Krankheit, Schizophrenie oder bestimmte Arten von Epilepsie gehen mit einer z.T. spezifisch veränderten Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke einher. Die Durchlässigkeit kann aber auch durch Fieber oder Bakterientoxine gesteigert werden. Vor diesem Hintergrund haben Berichte über eine Beeinflussung der Blut-Hirn-Schranke durch elektromagnetische Felder beträchtliches Aufsehen erregt.

Salford et al (2003) untersuchen den Einfluss von GSM-Mobilfunkfeldern auf die Blut-Hirn-Schranke (blood-brain-barrier / BBB) an 344 männlichen und weiblichen Ratten. Für die Untersuchungen werden je 32 männliche und weibliche Fischer Typ 344 Ratten im Alter zwischen 12 und 26 Wochen in 4 Gruppen herangezogen. Drei Gruppen werden je 2 Stunden lang alternativ Mikrowellen mit einer Leistungsdichte von 0,24 / 2,4 und 24 W/m² ausgesetzt. Dies ent-

spricht SAR-Raten von 2 mW/kg, 20 mW/kg und 200 mW/kg. Eine Gruppe wird scheinexponiert und dient als Kontrolle. Nach der Exposition leben die Tiere noch 50 Tage, bevor eine mikroskopische Untersuchung der Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für Albumin *in vitro* vorgenommen wird. Aus einer visuellen Beurteilung der Hirnschnitte wird eine wesentlich stärkere Penetration von Albumin bei exponierten Tieren als in Kontrollen festgestellt. Der Autor sieht eine Evidenz für einen neuronalen Schaden nicht nur im Kortex, sondern auch im Hippocampus.

Finnie et al. (2002) präsentieren eine Studie zur Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke unter der Einwirkung von GSM-Mobilfunkfeldern bei Mäusen. 138 weibliche Tiere im Alter von 8 Wochen, eingeteilt in 4 Gruppen, werden eine Stunde pro Tag, 5 Tage pro Woche, insgesamt 2 Jahre lang mit 900 MHz GSM-Mobilfunkfeldern mit alternativen SAR von 0,25 / 1, 2 und 4 W/kg exponiert. Eine Gruppe mit 9 Tieren dient als eine Käfigkontrolle und eine andere Gruppe wird als scheinexponierte Kontrolle herangezogen. Nach 2 Jahren wird die vaskuläre Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke mittels einer immunohistochemischen Messung des verabreichten Albumins in Hirnschnitten überprüft. Bei allen exponierten Tieren, wie auch bei allen Kontrollen ist die Albumin-Extravasation sehr gering und ist nur auf die Umgebung einiger Gefäße beschränkt.

Eine Langzeitexposition mit unterschiedlichen SAR-Niveaus bewirkt keine signifikante Veränderung der Durchlässigkeit in der Bluthirnschranke.

Fritze et al. (1997a) präsentieren eine Untersuchung der Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke von Ratten unter der Einwirkung von 900 MHz-Mikrowellen. Die 900 MHz-Welle weist entweder eine GSM-Modulation (SAR=0,3 oder 1,5 W/kg) auf oder sie ist ohne Modulation (SAR=7,5 W/kg). Die Untersuchung wird an Wistar-Ratten mit einem Gewicht zwischen 250 g und 300 g durchgeführt, wobei jeweils Gruppen von 20 Tieren exponiert und 2 x 20 Tiere als negative Kontrolle herangezogen werden. Die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für Al-

bumin wird mit einer immuno-histochemischen und histologischen Methode in 5 verschiedenen Ebenen des Gehirns durchgeführt. Die positive Kontrolle wird bei 2 Tieren durch eine Kälteverletzung der Blut-Hirn-Schranke eingeleitet. Bei den feldexponierten Tieren erfolgt die Untersuchung der Permeabilität bei 10 Tieren sofort und bei 10 Tieren 7 Tage nach der Exposition.

Bei den freilaufenden Tieren zeigt sich eine erhöhte Durchlässigkeit bei 1 von 10 Tieren, und zwar nur in einer Ebene. In 2 der 10 Tiere der scheinexponierten Gruppe werden in 3 Ebenen sofort nach der Untersuchung Defekte ermittelt. 7 Tage danach zeigt nur eins von 10 Tieren in einer Ebene des Gehirns eine erhöhte Penetration. Die SAR von 0,3 und 1,5 W/kg ergibt in 5 Tieren insgesamt 7 bzw. 6 Extravasationen sofort nach der Exposition, wobei 7 Tage danach eine deutliche Reduktion auf 2 bzw. 0 Extravasationen zu beobachten ist. Die SAR von 7,5 W/kg führt in 5 Tieren insgesamt zu 14 Extravasationen in 5 verschiedenen Ebenen des Gehirns sofort nach der Exposition, wobei diese Zahlen 7 Tage danach auf ein Tier und eine Extravasation reduziert werden.

Bereits die Scheinexposition führt, wahrscheinlich durch Stresseinwirkung, zu einer Erhöhung der Extravasationen von Albumin. Die Penetration der Blut-Hirn-Schranke wird bei der Exposition mit einer SAR von 0,3 und 1,5 W/kg weiter schwach erhöht. Eine statistisch signifikante Erhöhung der Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für Albumin wird aber erst bei einer SAR von 7,5 W/kg verzeichnet.

Salford et al. (1994) untersuchen die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke ohne und unter Einwirkung von 915 MHz-Mikrowellen an Ratten. In der jeweils 2-stündigen Exposition werden alternativ eine kontinuierliche Welle oder eine pulsmodierte Welle mit einer Pulsbreite von 0,57 ms und einer Wiederholrate von 8, 16 und 200 Pulsen/s bzw. einer Pulsbreite von 4 ms und einer Wiederholrate von 50 Pulsen/s appliziert. Die spezifische Absorptionsrate variiert zwischen 0,016 und 5 W/kg. Die Experimente werden mit 106 männlichen und 140 weiblichen Fischer-344-Ratten mit einem Gewicht zwischen

119 und 555 g durchgeführt. Für die Exposition werden Gruppen mit 21-28 Tieren, für die Kontrolle eine Gruppe mit 57 Tieren gebildet. 20 Min. und 2 Std. nach der Exposition wird die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für Albumin und Fibrinogen immunohistochemisch ermittelt. In der Bewertung wird die Anzahl der Tiere mit dem Extravasat in den Testsubstanzen, gemessen an der Anzahl der in der Gruppe untersuchten Tiere, sowie ein Verhältnis dieser Zahlen zwischen feldexponierten und Kontrolltieren angegeben. Die Ergebnisse zeigen, dass nur Albumin, nicht aber Fibrinogen die Blut-Hirn-Schranke durchdringen kann. In den Kontrolltieren ist nur in 5 von 62 Fällen eine Extravasation des Albumins feststellbar. Die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke wird unter der Feldeinwirkung 3,1 bis 5 mal gegenüber den Kontrollversuchen erhöht. Dabei scheint der OR-Wert in dem Bereich der SAR zwischen 0,016 und 4 W/kg keinen funktionellen Zusammenhang zu haben. Erst bei SAR-Werten oberhalb von 4 W/kg zeigt sich mit OR=6 ein deutlicher Anstieg.

Eine höhere Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für kleine Moleküle des Albumin mit $kD=69.000$ als für Fibrinogen mit $kD=400.000$ ist wegen der unterschiedlichen Molekülgröße verständlich. Die erhöhte mittlere Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für bereits sehr niedrige SAR-Werte könnte auch aus einem Artefakt durch die z.T. sehr niedrige Anzahl der Versuchstiere (2 pro Feldeinstellung) resultieren. Der deutliche Anstieg der Häufigkeit der Albumin-Durchlässigkeit bei SAR-Werten oberhalb von 4 W/kg lässt sich auf eine thermische Wirkung zurückführen.

Die vorgestellten Untersuchungen zur Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke werden durchweg an Ratten durchgeführt. Inwieweit diese Verhältnisse auf den Menschen übertragbar sind, ist unklar. Bereits bei Kontrolltieren wird eine sehr unterschiedliche Durchlässigkeit für kleine Moleküle beobachtet. Einwirkungen wie z. B. Stress haben offensichtlich auch einen Einfluss auf die Penetrationsrate. Eine Reihe von Autoren zeigt auch bei sehr kleinen Leistungsdichten bzw. niedrigen SAR-Werten eine 2- bis 3-fach erhöhte

Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke auf. Die größten Veränderungen werden sofort nach der Exposition beobachtet, mit der Zeit nimmt die Zahl der Extravasationen stark ab und ist mit den Verhältnissen bei Kontrolltieren vergleichbar. Erst bei SAR-Werten oberhalb von 5 W/kg, die bereits eine schwache Erwärmung im Körper verursachen, kann in gesicherten Untersuchungen wiederholt eine statistisch signifikante Erhöhung der Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke beobachtet werden. Unter Berücksichtigung der großen extra- und intraindividuellen Schwankungen der Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke einerseits und der in einigen Studien für eine statistische Aussage nicht ausreichende Anzahl von Versuchstieren pro Expositionsgruppe andererseits scheint die thermische Wirkung der Mikrowellen der primäre Faktor für die beobachteten Erhöhungen der Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke zu sein. Derart starke hochfrequente Felder werden in den für den Menschen frei zugänglichen Bereichen nicht aufgebaut.

7.9 Neuroendokrines System und Hormone

Das neuroendokrine System stellt im menschlichen Körper die Zentrale zur Steuerung des Stoffwechsels, zur Regelung des inneren Milieus (z.B. Kreislauf, pH-Wert, Wasser- und Energiehaushalt, Körpertemperatur etc.) und für die Reifungs- und Fortpflanzungsmechanismen des Organismus dar. Darüber hinaus leitet das neuroendokrine System die Antworten des Organismus auf seine Umwelteinflüsse ein, wobei in die Entscheidung Reize aus der Umwelt, psychisch-emotionale Faktoren und Rückkopplungsmechanismen aus dem Körper integriert werden.

Die Informationsübertragung im neuroendokrinen System erfolgt relativ langsam über Hormone. Auf Befehle der höheren Zentren des ZNS werden diese Botenstoffe entweder in spezialisierten Zellen des Hippocampus (neuroendokrine Zelle) oder in anderen vom Zentralnervensystem gesteuerten Zellen und Drüsen produziert

und in das Blut ausgeschüttet. Über den Blutkreislauf erreichen diese "second messengers" alle Zellen und Organe des Körpers.

Die meisten Neuronen setzen dagegen in ihren Endigungen Übertragungstoffe oder Transmitter (z. B. Acetylcholin, Adrenalin, u. a.) frei, die nur die kurzen Strecken des synaptischen Spalts überwinden und auf diese Weise die Membranspannung der benachbarten Zelle beeinflussen. Die vielfältigen vitalen Aufgaben des neuroendokrinen Systems machen klar, dass eine wie auch immer geartete Beeinflussung des Systems schwerwiegende Folgen für den Organismus nach sich ziehen würde. Deshalb ist es auch verständlich, dass sich die Erforschung der elektromagnetischen Umweltverträglichkeit bereits von Anfang an mit der Frage einer eventuellen Einflussnahme elektromagnetischer Felder auf das neuroendokrine System auseinandergesetzt hat. Allerdings haften, aus heutiger Sicht betrachtet, vielen Untersuchungen methodische Mängel an, die die Arbeiten rudimentär erscheinen lassen. Einige dieser Arbeiten sollen wegen ihrer Einmaligkeit an dieser Stelle trotzdem aufgeführt werden.

Mann et al. (1998) untersuchen die Wirkung von GSM-Mikrowellen auf das neuroendokrine System. 22 gesunde männliche Probanden im Alter zwischen 18 und 37 Jahren werden für diese Untersuchung ausgesucht. Sie leiden nicht unter Schlafstörungen, rauchen nicht und nehmen keine Drogen. Alkoholkonsum ist vor und während der Untersuchung verboten. Drei aufeinander folgende Nächte verbringen diese Probanden im Schlaflabor unter definierten Bedingungen. Vor, während und nach dem Schlaf können den Probanden über einen Katheter Blutproben entnommen werden. Die Blutproben werden sofort zentrifugiert und unter $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufbewahrt. Alle Proben eines Probanden werden auf einmal analysiert. Dabei wird die Serumkonzentration von 4 Hormonen ermittelt, die unterschiedliche Assoziationen durch zirkadianen und Schlaf-Wach-Rhythmus aufweisen sollen. Dies sind das Wachstumshormon (GH), Kortisol, das luteinisierende Hormon (LH) und Melatonin.

In der Expositionsphase wird ein 900 MHz-GSM-Feld über eine Antenne, die in einer Distanz von 40 cm vom Kopf des Probanden aufgestellt ist, appliziert. Die mittlere Leistungsdichte im Bereich des Kopfes beträgt $20\text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Während der gesamten Untersuchungsphase zwischen 23.00 Uhr und 7.00 Uhr morgens werden die Probanden im Schlaf alternativ einem Feld ausgesetzt oder als Placebo ohne Feldeinwirkung beobachtet.

Die Ergebnisse zeigen bei den Parametern GH, Kortisol, und Melatonin ihre typischen nächtlichen Verläufe. Im Vergleich zu verschiedenen Zeitpunkten ergeben sich temporär durchaus signifikante Unterschiede zwischen der Placebo- und feldexponierten Gruppe. So z. B. ist der Melatonin-Pegel unter der Befeldung um 3.00 Uhr morgens statistisch signifikant um fast 100 % höher als bei der Placebo-Versuchsperson. Betrachtet man im Mittelwert über die ganze Nacht hinweg die gesamte Ausbeute der einzelnen Hormone, so ergibt sich keine statistisch signifikante Unterscheidung der Ausbeute zwischen den placebo- und feldexponierten Probanden. Die Ergebnisse deuten an, dass beim Menschen relativ schwache GSM-Mikrowellen keine ausgeprägte Beeinflussung der nächtlichen Hormonsekretion verursachen.

Braune et al. (1998) führen Untersuchungen mit Probanden unter der Wirkung von 900 MHz-GSM-Feldern durch. 7 gesunde Männer und 3 Frauen im Alter zwischen 26 und 36 Jahren unterziehen sich einseitig blinden Untersuchungen, wobei ein betriebenes oder ausgeschaltetes Handy an der rechten Seite des Kopfes in Normalposition gehalten wird. Das marktübliche Handy wird mit 2 W betrieben. Zur Überprüfung der Wirkung von GSM-Handys werden Blutdruck, Herzfrequenz, kapillare Perfusion und subjektives Wohlbefinden aufgenommen. Im Versuchsablauf wechseln sich Phasen mit Placebo- und Feldexposition von jeweils 25 Min. Dauer ab. Die Untersuchungen werden 5-mal an verschiedenen Tagen wiederholt. Nach 35-minütiger Exposition werden Parameterwerte im Ruhezustand, im liegenden Zustand und als Antwort auf Aufrichtung über 60 Min., nach einer tiefen Atmung mit 6 Atmungszyklen/Min. und

das Valsalva-Manöver mit 40 mm Hg-expiratorischem Druck gemessen. Der Valsalva-Versuch dient der Überprüfung der Herzfunktion, bei der ein Patient nach einer tiefen Inspiration bei geschlossenem Mund und zugehaltener Nase einen Überdruck im Nasen-Rachen-Raum erzeugt.

Die statistische Bewertung zeigt keinen Einfluss des Feldes auf subjektive Parameter. Unter der Wirkung von Mikrowellen sind der systolische und diastolische Blutdruck im Ruhezustand signifikant höher als in der vergleichbaren Placebo-Position. Der Blutdruck nach 30 bzw. 60 Sek. im aufrechten Zustand ist signifikant höher unter Feldexposition und ohne eine signifikante Differenz in der Ruheamplitude. Beim Valsalva-Manöver ist der Unterschied im Blutdruck während der Ruhephase signifikant niedriger während Phase 1, und signifikant höher während Phase 2 unter der Exposition, während die absoluten Blutdruckwerte keine signifikante Differenz mehr aufzeigen. Die Autoren leiten von der Exposition der rechten Hemisphäre mit Handy-Feldern über 35 Min. Dauer eine erhöhte sympathische Efferenzaktivität ab, die den Ruhe-Blutdruck um 5-10 mm Hg (ca. 5 %) anhebt. Die über Baroreflex vermittelte Regulation des Blutdrucks wird nicht beeinflusst.

Zur Überprüfung eigener Hypothesen führen **Lai et al. (1992)** Untersuchungen mit Opiat-Rezeptoren unter der Einwirkung von gepulsten Mikrowellen durch. Eine 2,45 GHz-Welle, impulsmoduliert mit 2 μ s Pulsbreite und bestehend aus 500 Pulsen/s, weist eine mittlere Leistungsdichte von 1 mW/cm² auf. Der Spitzenwert der Leistungsdichte erreicht 1 W/cm². Ratten aus Standardhaltung erfahren vor der Exposition Injektionen mit spezifischen Antagonisten der Opiat-Rezeptoren im lateralen Zerebroventrikel. Sofort nach der 45-minütigen Exposition wird die natrium-abhängige Cholinaufnahme im Frontalkortex und Hippocampus szintigraphisch untersucht.

Die statistische Bewertung der Resultate zeigt, dass alle applizierten Antagonisten der Opiat-Rezeptoren die Mikrowellen-induzierte Veränderung der cholinergen Aktivität im Hippocampus beeinflussen können. Dagegen wird im frontalen

Cortex kein Einfluss der Opiat-Rezeptor-Antagonisten unter Feldeinwirkung beobachtet. Hieraus wird abgeleitet, dass der Mikrowelleneinfluss auf den Cortex nicht über endogene Opiate vermittelt wird.

In einer weiteren Verfeinerung untersuchen **Lai et al. (1992)** die Effekte von Mikrowellen auf Benzodiazepine-Rezeptoren im Gehirn von Ratten. Für die Befeldung werden 2,45 GHz-Felder, pulsmoduliert mit 2 μ s Pulsbreite und bestehend aus 500 Pulsen/Sek., bei einer Leistungsdichte im Bereich des Kopfes von 1 mW/cm² und einer mittleren Ganzkörper-SAR von 0,6 W/kg verwendet. Bei Ratten, die standardmäßig in Gruppen ausgesucht und vorbereitet werden, beträgt die Exposition 45 Min. und sie wird 1 mal oder 10 mal wiederholt. Die Konzentration und Affinität des Benzodiazepine-Rezeptors im Zentralkortex, Hippocampus und Cerebrum wird nuklearmedizinisch untersucht. Dieser Rezeptor wird im Gehirn für die Vermittlung von Gefühl, Stress und Ermüdung verantwortlich gemacht. Sofort nach der Exposition wird eine statistisch signifikante Erhöhung des Rezeptors im Cortex, nicht aber im Hippocampus und Cerebrum beobachtet. Die Affinität des Rezeptors wird durch Mikrowellen in keiner Gehirnregion beeinflusst. Eine wiederholte Exposition durch Mikrowellen ergibt ebenfalls keine statistische Abweichung der Rezeptorkonzentration zwischen den feld- und den scheinexponierten Tieren im Cortex sofort nach der Exposition. Von diesen Ergebnissen wird abgeleitet, dass die angewandten Mikrowellen den Benzodiazepine-Rezeptor im Gehirn nicht beeinflussen können.

Die herangezogene Literatur zeigt exemplarisch die Breite und Komplexität der Untersuchungen des neuroendokrinen Systems. Viele physiologische Vorgänge werden noch nicht verstanden, zur Erklärung von beobachteten Veränderungen werden oft eigene Hypothesen herangezogen. Trotz einer vielfachen Verkopplung verschiedener Steuerungsmechanismen und -systeme im ZNS sind mit den heutigen Untersuchungsmethoden nur isolierte Kreise, häufig auch nur indirekt, zugänglich. Auf dieser Grundlage stellt sich die Frage nach der Wertigkeit der präsentierten Ergebnisse. Die beobachteten Effekte sind

schwach und sie werden mit relativ starken Feldern erzielt. Daher kann eine thermische Beteiligung nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Die Konsequenz dieser geringen Veränderung für das Tier und vor allem für den Menschen ist noch völlig ungeklärt. Darüber hinaus werden derart starke Felder von keiner im Alltag anzutreffenden hochfrequenten Anlage erzeugt.

Andererseits zeigen die Untersuchungen, dass mit dezidierten biologisch/medizinischen Methoden ein detailliertes Wissen gewonnen werden kann. Insbesondere die pharmakologische Methode der Ausschaltung verschiedener Rezepto-

rensysteme im ZNS eröffnet einen exzellenten Weg zur Verfolgung der Wirkungsmechanismen eines eindeutig nachgewiesenen Effektes. In diesem Punkt sind allerdings gewisse Defizite vorhanden, da die speziellen Untersuchungen von einzelnen Forschergruppen publiziert und repliziert wurden, was dem wissenschaftlichen Anspruch für einen belegten Effekt nicht genügt. Diese verfeinerten Methoden sollten da angesetzt werden, wo Wirkungen der Mikrowellen auf z.B. kognitive Funktionen des ZNS oder auf den Schlaf eindeutig nachgewiesen wurden.

8. Einfluss hochfrequenter Felder auf Sinnesrezeptoren

Die stärksten hochfrequenten Felder werden im Körper von den in der Nähe des Kopfes betriebenen Handys aufgebaut. Demnach werden Kopf und darin Gehirn, Seh- Hör- und Gleichgewichtsapparat einseitig mit den stärksten Feldstärken der Mobilfunkfelder durchsetzt. Dabei gehören die Hör- und Sehorgane zu den empfindlichsten und wichtigsten Sinnesrezeptoren des Menschen, wobei das Auge sogar auf die Wahrnehmung eines schmalen Spektrums der elektromagnetischen Wellen im sichtbaren Spektrum spezialisiert ist. Diese Tatsache, zusammen mit weiteren Gesichtspunkten wie z.B. der relativ geringen Durchblutung des Auges und einer daraus folgenden Anfälligkeit gegenüber übermäßiger Erwärmung, machen die Betrachtung einer eventuellen Beeinträchtigung dieser Organe durch die Mikrowellen der Mobilfunkanlagen unumgänglich.

Beide Sinnessysteme sind nachweislich im Stande, bestimmte elektromagnetische Felder auch nichtadäquat wahrzunehmen. Niederfrequente elektromagnetische Felder lassen ab einer bestimmten Flussdichte an der Peripherie des Sehfeldes Flickereffekte entstehen, die man als Phosphene bezeichnet. Dieses Phänomen ist bisher nur für sehr niedrige Frequenzen belegt. Die Linsentrübung, auch als Katarakt bezeichnet, wird z. T. mit einer übermäßigen Wärmeentwicklung im Auge in Verbindung gebracht. Schließlich können starke hochfrequente Felder akustische Wahrnehmungen erzeugen. Es stellt sich also die Frage, inwieweit die Mobilfunkfelder, insbesondere die von Handys im Kopf aufgebauten Felder, in irgendeiner Weise einen der beiden oder beide Sinnesapparate beeinflussen oder sogar schädigen könnten.

Lu et al. (2000) führen Untersuchungen an Affen zur Überprüfung der Wirkung von gepulsten Mikrowellen im Auge durch. Die Augen werden mit einer 1,25 GHz-Welle gepulst mit einer Pulsbreite von 5,59 μ s, bestehend aus 0,59, 1,18 und 2,79 Pulsen/Sek. exponiert. Der Mittelwert der SAR in der Retina liegt zwischen 4,3 und 20

W/kg, wobei der Spitzenwert 13 MW/kg erreicht. Zur Beurteilung einer eventuellen Beeinträchtigung des Auges wird nach der Exposition mikroskopisch die Anzahl der Defekte ausgezählt. Darüber hinaus erfolgt eine Aufzeichnung des Elektroventrikulogramms zur Bewertung der retinalen Summenpotentiale. Die 4-stündige Exposition wird an drei Tagen/Woche, 3 Wochen lang wiederholt. Die Ergebnisse zeigen keine Läsionen der retinalen Struktur. Die elektrische Antwort der retinalen Zellen ist bei höheren SAR-Werten leicht erhöht.

Kues et al. (1992) führen Untersuchungen der Einflussnahme von Mikrowellen auf die Häufigkeit von Läsionen im Auge von Affen durch. Für die Untersuchung werden erwachsene Rhesus-Affen im Alter zwischen 4 und 18 Jahren mit einem Gewicht zwischen 4 und 7 kg herangezogen. Mittels eines Wellenleiters werden aus einer Entfernung von 10 cm 2,45 GHz-Felder impulsmoduliert mit 10 μ s Pulsbreite und 100 Pulsen/s, jeweils 4 Std./Tag an 3 aufeinander folgenden Tagen exponiert. Alternativ wird eine Leistungsdichte von 0, 5, 10 und 15 mW/cm² appliziert, was einer SAR von 0, 1,3, 2,6 und 3,9 W/kg entspricht. In einer separaten Gruppe werden die schein- und feldexponierten Tiere zusätzlich mit den ophthalmologischen Medikamenten Timolol oder Pilocarpin vorbehandelt. Zur Beurteilung der Feldwirkung wird sofort nach der Exposition die vaskuläre Permeabilität der Iris auf Fluoreszein sowie auf die Häufigkeit der Läsionen in der Cornea untersucht. Der statistische Vergleich der Resultate zwischen schein- und feldexponierten Tieren zeigt, dass ab einer Leistungsdichte von 10 mW/cm² die Häufigkeit der cornealen endotheliosen Läsionen sowie die Permeabilität der Iris zunimmt. Die Schwelle für die Schädigung sinkt nach der Vorbehandlung mit den Medikamenten Timolol oder Pilocarpin sogar unter eine Leistungsdichte von 1 mW/cm². Für eine 4-stündige Exposition mit 20 mW/cm² wird eine Temperaturerhöhung im Auge von 0,77 °C ermittelt. Dies bedeutet, dass die in der Untersuchung angewandten Mikrowellen die

beobachteten Defekte nicht allein über eine thermische Wirkung verursachen können.

Im Alltag werden die stärksten hochfrequenten Felder von Handys aufgebaut. Die von Handys im Kopf aufgebaute Leistungsdichte liegt maximal bei ca. 1 mW/cm^2 . Mit diesen maximalen Leistungsdichten kann etwa in der motorischen und sensorischen Großhirnrinde einer Hirnhälfte gerechnet werden. Im Bereich des Auges treten wegen des Abstandes zur Antenne wesentlich schwächere Leistungsdichten im Bereich unter $0,2 \text{ mW/cm}^2$ auf. In der Literatur wird gezeigt, dass Mikrowellen unterschiedliche Defekte und Läsionen oder sogar eine Trübung des Auges verursachen können. Relativ übereinstimmend ergibt sich, dass die Schwelle für eventuelle Schädigungen oberhalb von 10 mW/cm^2 beim gesunden Auge liegt. Obwohl diese Untersuchungen aus ethischen Gründen nur als Tierexperimente vorgenommen werden können, spricht nichts gegen eine Übertragbarkeit dieser Resultate auf das menschliche Auge, vorausgesetzt, die festgestellten Leistungsdichten und SAR-Werte wurden verlässlich ermittelt. Danach dürften auch unter ungünstigsten Verhältnissen z.B. die Felder der 2 W-Handys keine Gefährdung für das Auge darstellen. Umso mehr gilt diese Feststellung für die wesentlich schwächeren Felder der Mobilfunk-Basisstationen sowie der Rundfunk- und Fernseh-Sender.

Unter der Beeinflussung von Medikamenten, die in das Auge appliziert werden, hat sich nach

einem Bericht eine deutliche Herabsenkung der Schwelle bis unter 1 mW/cm^2 ergeben. Die Richtigkeit dieser Meldung muss in Wiederholung überprüft werden. Bei Bestätigung müssen eventuelle Konsequenzen und Gegenmaßnahmen für betroffene Patienten ausgearbeitet werden.

Die Natur akustischer Wahrnehmungen in gepulsten Mikrowellen wurde bereits in den 70er und 80er Jahren erforscht. Durch eine fokale Erwärmung im Gehirn entsteht eine thermoplastische Welle, die sich im Kopf als akustische Welle bis zum Innenohr ausbreitet und die Hörrezeptoren anregt. Hier ist die Frage zu stellen, inwieweit die Felder der Mobilfunkanlagen derartige Effekte hervorrufen können.

Für die Induktion von Hörwahrnehmungen durch impulsmodulierte Mikrowellen müssen einzelne Schwingungspakete eine bestimmte Pulsbreite und minimale Energiedichte aufweisen. Die Pulsbreite der GSM-Schwingungspakete beträgt $3,69 \mu\text{s}$ und liegt damit im relevanten Intervall.

Die Wahrscheinlichkeit einer akustischen Wahrnehmung der von Handys gesendeten Mikrowellen ist aber sehr gering, da die Energiedichte einzelner Impulse mindestens um einen Faktor 1000 unter den ermittelten Schwellen liegt. Eine akustische Wahrnehmung der Felder von Basisstationen ist gänzlich ausgeschlossen, da deren Stärke mindestens 6 Zehnerpotenzen unterhalb der Schwelle liegt.

9. Einfluss hochfrequenter Felder auf elektronische Implantate

Die in den Körper eindringenden Felder der Mobilfunkanlagen koppeln sich in die Elektronik der im Körper implantierten Aggregate wie Herzschrittmacher, Herzdefibrillator, Nerven- und Muskelstimulatoren oder Cochlea-Implantate. Die Elektronik dieser Implantate ist meist für die Verarbeitung niederfrequenter elektrischer Signale ausgelegt. Mikrowellen werden in dieser Elektronik gleichgerichtet. Dies kommt einer Demodulation gleich, eine niederfrequente Umhüllende wird weiter verstärkt und verarbeitet. Durch eine derartige Interferenz kann es zur Beeinflussung der Funktion von Implantaten kommen, was im Falle des Herzschrittmachers oder des implantierten Defibrillators lebensgefährlich sein könnte. Deshalb wird der Problematik der Störung von Herzschrittmacher-Systemen in der Literatur ein hoher Stellenwert eingeräumt. Im Vordergrund des Interesses stehen selbstverständlich Handys, die im Körper die stärksten pulsmodulierten Felder aufbauen können.

Hekmat et al. (2002) berichtet über eine Untersuchung mit 200 Herzschrittmacherträgern (116 Männer, 84 Frauen) im Alter zwischen 6 Monaten und 90 Jahren zur Überprüfung der Störanfälligkeit bei der Nutzung von D2-Handys. Insgesamt werden 58 verschiedene Schrittmachermodelle (107 Einkammer- und 93 Zweikammersysteme) untersucht. Als Feldquelle wurde ein herkömmliches D 2-Netz oder E-Netz-Handy in unterschiedlichen Funkzuständen und Distanzen zum Herzschrittmacher herangezogen und bis auf die Haut oberhalb des Implantats angenähert. Die maximale Leistung des D2-Handys beträgt 2 W, beim E-Netz-Handy nur 1 W.

Nur 4 Herzschrittmacher (2 %) konnten durch das Anlegen der Handys gestört werden. Davon schalten 3 unipolare Herzschrittmacher auf ihre Störfrequenz und ein bipolarer Herzschrittmacher mit einer Empfindlichkeit von 0,6 mV wird inhibiert. Durch eine Umprogrammierung auf 1,25 mV konnte die Inhibition verhindert werden.

Elshershari et al. (2002) prüfen, inwieweit bei Kindern implantierte Herzschrittmacher durch die GSM-Handys gestört werden können. Insgesamt wurden in 95 junge Patienten (53 männlich, 42 weiblich) im Alter zwischen 1 und 22 Jahren (Mittelwert 11,5 Jahre) Herzschrittmachern von 5 verschiedenen Herstellern (Medtronic, Telectronics, Viatron, Pacesetter und Biotronik), davon 85 rechts-, der Rest linkspektoral, implantiert. Die Untersuchung mit einer kontinuierlichen Messung des EKG wird im Liegen durchgeführt. Die Leistung des GSM-Testhandys wird zwischen 0,2 und 2 W variiert, darüber hinaus werden die Handy-Betriebszustände Einschalten, Wählen und Konversationsphase nach und nach gewählt. Nur bei einem von 95 Patienten (1 %) zeigt sich ein Umschalten des Herzschrittmachers in einen festfrequenten Störmodus als Folge der Annäherung eines Handys.

Nowak et al. (1996) führen Untersuchungen mit 31 Patienten (17 männliche und 14 weibliche) mit implantierten Herzschrittmachern durch. 31 unterschiedliche Herzschrittmachertypen (12 Intermedics, 10 Medtronic und 9 Vitatron) sind bei diesen Patienten implantiert. Für die Störüberprüfung werden alle Herzschrittmacher auf eine unipolare Stimulation geschaltet, wobei die niedrigste Empfindlichkeitsschwelle des jeweiligen Herzschrittmachers mit Werten zwischen 0,1 und 0,25 mV für die atriale und 1 mV für ventrikuläre Stimulation eingestellt wird. Zur Exposition kommt ein handelsübliches GSM-D-Netz-Handy PPU 902 der Fa. Orbitel, das mit voller Leistung von 2 W betrieben wird. Das Handy wird an der Thorax-Oberfläche derart angebracht, dass die Antenne die Haut an der rechten sternalen Grenze berührt. Die Distanz zwischen der Antenne und dem Stecker des Herzschrittmachers beträgt mindestens 5 cm. Das Handy wird bei der Überprüfung der Störung des Herzschrittmachers alternativ im Einschalt-, Sprech- oder Hörmodus betrieben. Eine Funktionsüberprüfung des Herzschrittmachers

wird kontinuierlich mittels der EKG-Aufnahme vorgenommen. Das Handy-Feld verursacht bei keinem der Patienten eine Funktionsstörung.

Irnich et al. (1996) führen Untersuchungen der Störbeeinflussung von 231 unterschiedlichen Herzschrittmacher-Modellen von 20 Herstellern in einem stark vereinfachten Modell durch. Das Herzschrittmacher-System mit Aggregat und Elektrode wird dabei in eine Kochsalzlösung eingetaucht, wobei die Handy-Antenne bis auf 10 mm an die Herzschrittmacher-Elektrode angenähert werden kann. Das 900 MHz-D-Netz-Feld wird mit einer Leistung von 2 W appliziert. Über die Aufnahme der Stimulationsfrequenz wird untersucht, inwieweit die Herzschrittmacher in Abhängigkeit von Leistung und Abstand der Handy-Antenne gestört werden können. Die während der Untersuchung eingestellte Empfindlichkeit der einzelnen Herzschrittmacher wird nur pauschal mit einem Mittelwert von $2,15 \text{ mV} \pm 0,7 \text{ mV}$ (Minimum 0,34 mV, Maximum 5,8 mV) und für den atrialen Kanal mit $1,08 \text{ mV} \pm 0,46 \text{ mV}$ (Minimum 0,05 mV, Maximum 2,47 mV) angegeben. Bei dem minimalen Abstand des 2 W-Handys von der Schrittmacher-Elektrode werden 34 % der untersuchten Herzschrittmacher auf verschiedene Weise gestört. Aus diesen Resultaten wird die Empfehlung für die Patienten abgeleitet, einen Abstand zwischen Handy und Herzschrittmacher von mindestens 20 cm, bei Schnurlostelefonen von mindestens 15 cm einzuhalten.

Hofgärtner et al. (1996) führen Untersuchungen an 104 Herzschrittmacher-Patienten (54 männlich, 50 weiblich, Durchschnittsalter 75,8 Jahre) mit 58 unterschiedlichen Herzschrittmachertypen (43 Einkammer-, 15 Zweikammer-Systeme) durch. Getestet wird die Störbeeinflussung dieser Herzschrittmacher unter anderem durch D-1-portable Geräte mit 8 W sowie D-1-Handys mit 2 W Leistung. Zu Beginn der Untersuchung werden die Herzschrittmacher auf unipolaren Betrieb und maximale Empfindlichkeit eingestellt. In diesem Zustand wird die Lage des portablen Gerätes bzw. des Handys ermittelt, die zur größten Störbeeinflussung führt. Im weiteren Untersuchungsverlauf dienen die Empfindlichkeit des Herzschrittmachers sowie der Abstand zwischen

Herzschrittmacher und Handy als weitere Variable. Während der gesamten Untersuchung wird die Funktion des Herzschrittmachers mit einer kontinuierlichen EKG-Aufnahme dokumentiert.

Unter ungünstigsten Bedingungen (höchste Empfindlichkeit, Handy liegt am Brustkorb in ungünstigster Lage) verursachen die 8 W-D-Portablen bei 27 Herzschrittmachermodellen (46,8 %) eine Störung. In diesem Testzustand lässt sich ein Herzschrittmacher sogar bei einem Abstand von 120 cm durch einen 8 W-Portablen in einen Stöorzustand versetzen. Bei den Tests mit 2 W-D-Handys werden nur 13 Herzschrittmacher (22,4 %) gestört.

Eine typische Einstellung der Empfindlichkeit auf 2,5 mV führt nur bei 19 % der Herzschrittmacher zu einer Störung. Die durchschnittliche maximale Entfernung zwischen dem Herzschrittmacher und dem Handy, die noch eine Störung einleitet, liegt bei unipolaren Herzschrittmachern bei 10,7 cm und bei bipolaren bei 6,5 cm.

Aus den Ergebnissen werden Empfehlungen für Herzschrittmacherpatienten abgeleitet:

- a) das Handy, wenn überhaupt, in größtmöglicher Entfernung vom Herzschrittmacher tragen und benutzen,
- b) die Wahrnehmungsfunktion des Herzschrittmachers auf bipolaren Betrieb schalten,
- c) die Empfindlichkeit möglichst niedrig einstellen lassen.

Wilke et al. (1996) testen das Verhalten von implantierten Herzschrittmachern unter der Einwirkung von D-Netz- und 2 W-Handys (Ericsson) bei 50 Herzschrittmacher-Patienten. Insgesamt liegen 24 Einkammer- und 21 Zweikammer-Herzschrittmacher vor. Das Alter der Patienten (24 weiblich, 26 männlich) liegt zwischen 48 und 87 Jahren. Unter den Herzschrittmachern befinden sich 27 bipolare und 27 unipolare Systeme, insgesamt 21 unterschiedliche Herzschrittmacher-Modelle von 7 verschiedenen Herstellern. Zusätzlich werden zwei implantierte Defibrillatoren von zwei verschiedenen Firmen getestet. Während der Untersuchung führen die Patienten ein Telefongespräch per GSM-D-Netz-Handy.

Während der gesamten Untersuchung werden die Patienten über die EKG-Aufnahme überwacht. Nur bei 2 von 50 Patienten zeigen sich intermittierende Inhibitionen der Herzschrittmacher während der Manipulation mit dem Handy. Die Defibrillatoren werden durch die Felder der Handys in keiner Phase gestört.

Barbaro et al. (1995) ziehen 101 Herzschrittmacher-Patienten zur Untersuchung von Störbeeinflussungen durch Handys heran. Bei den Patienten sind insgesamt 39 unterschiedliche unipolare und 4 bipolare Herzschrittmacher von 11 Firmen implantiert. Im Störtest werden herkömmliche GSM-900 MHz-Handys (Dynatac und Micro) mit ausziehbarer Antenne und 2 W Leistung angewandt. Die Handys mit ausgezogener Antenne werden derart platziert, dass die Antenne den Brustkorb oberhalb der Implantationslage auf der rechten subpektoralen Seite berührt. Unter der Kontrolle eines Computers wird das Handy alternativ in 3 Zustände (Einschalten, Wählen für 3-6 Sek. und Ausschalten) versetzt. Um zu erkennen, inwieweit der Herzschrittmacher durch Störung auf den asynchronen Modus umschaltet, wird die Frequenz des Herzschrittmachers auf 20 Pulse pro Minute niedriger als den Herzrhythmus des Patienten programmiert. Gleichzeitig wird auch die jeweilige eingestellte Empfindlichkeit des Herzschrittmachers abgefragt und dokumentiert. Zur kontinuierlichen Überwachung der Herzschrittmacherfunktion erfolgt eine EKG-Aufnahme.

In 26 von 101 (26 %) implantierten Herzschrittmachern ergibt sich eine Interferenz mit den Handys. Eine Pulsinhibition wird in 10 von 101 Fällen, eine ventrikuläre Triggerung bei 9 von 46 untersuchten Schrittmachern beobachtet. 4 von 52 Aggregaten schalten auf asynchronen Betrieb um. Wenn die Herzschrittmacher auf die niedrigste Empfindlichkeit programmiert werden, bleibt die Störung bis zu einem Abstand von 10 cm zwischen dem Schrittmacher und dem Handy bestehen. Bei der Standard-Einstellung der Empfindlichkeit für Ventrikel und Atrium mit Schwellen von 4 bzw. 2,5 mV muss die Handy-Antenne den Körper direkt berühren, damit es zu einer Störung kommt.

Alle Untersuchungen zeigen übereinstimmend, dass die implantierten Herzschrittmacher im Alltag durch pulsmodierte hochfrequente Felder gestört werden können. Derartige Felder kommen bei digitalem Mobilfunk (D- und E-Netz) sowie in einigen Artikelüberwachungssystemen vor. Ausreichende Erkenntnisse stehen nur aus Untersuchungen mit Handys im D-Netz zur Verfügung. Unter experimentellen Bedingungen steigt die Häufigkeit der Störfälle mit der Empfindlichkeit der Herzschrittmacher und mit der Verringerung des Abstandes zwischen dem Herzschrittmacher und dem Handy an. Bei einigen Herzschrittmachern führt die Umschaltung von unipolarem auf bipolaren Betrieb zur Verringerung der Störanfälligkeit; dies lässt sich jedoch nicht pauschal auf alle Herzschrittmachertypen übertragen. Bei der Einstellung der maximalen Empfindlichkeit der Herzschrittmacher kommt es in 40 % der Fälle zu einer Störung durch das Handy. Dies entspricht aber einer "worst case"-Situation – in der Praxis muss für eine normale Funktionalität des Herzschrittmachers eine niedrigere Empfindlichkeit eingestellt werden.

Unter praktischen Bedingungen kann bei weniger als ca. 10 % der Herzschrittmacher-Patienten mit einer Störung gerechnet werden, wenn das Handy in der Brusttasche getragen oder in weniger als 10 cm Abstand zum Herzschrittmacher-Aggregat benutzt wird.

Inwieweit Herzschrittmacher mit Defibrillatoren durch die Felder der D-Netz-Handys gestört werden können, lässt sich aus den bisher vorgelegten Studien mit der Überprüfung von 2 Handy-Typen nicht abschließend beantworten. Zwar gibt es weitere, meist US-amerikanische Studien, denen Untersuchungen mit analogen oder nicht GSM-modulierten Handys zu Grunde liegen. Die Ergebnisse dieser Studien sind jedoch nicht auf die europaweit verwendeten Mobilfunk-Systeme übertragbar. Die Störung anderer Implantate und Körperhilfen, insbesondere, wenn sie mit einer Elektronik ausgestattet sind, durch einige Felder des Alltags lässt sich nicht ausschließen. Zur Beurteilung der tatsächlichen Situation fehlen bisher zugeschnittene experimentelle Überprüfungen.

10. Sonstige Studien

In einer Art ökologischer Untersuchung zum Einfluss elektromagnetischer Felder auf Gesundheit, Leistung und Verhalten von Rindern (Volmer et al. 2000) wurden insgesamt 38 Betriebe in Bayern und Hessen nach Vorgaben der Betreiber, der Bayerischen Staatsregierung und von Tierärzten ausgewählt. Die Kriterien für die Auswahl dieser Betriebe wurden in der Studie nicht näher erläutert. Die Exposition durch die Mobilfunk-Basisstationen im C- und D-Netz sowie durch die vorhandenen UKW- und Fernsehsender wurden nach dem Standard-Verfahren segmentselektiv von Wuschek messtechnisch ermittelt. Diese zunächst im Jahr 1998 vorgenommene Messung wurde in 17 Betrieben nach dem Abschluss der tiermedizinischen Untersuchungen wiederholt. Auch diese Wiederholung hat im Prinzip die in den ersten Messungen festgestellten Emissionen bestätigt. Die Studie wurde durch die Bayerische Landesregierung und Mobilfunkbetreiber finanziert, die Durchführung oblag den Abteilungen der Veterinärmedizin, der Genetik und Zytogenetik der Justus Liebig-Universität Gießen und dem Institut für Tierhygiene, Verhaltenskunde und Tierschutz der Ludwig-Maximilian-Universität München.

Die durchführenden Institutionen haben bei allen Betrieben erhebliche Mängel in der Tierhaltung festgestellt. Als besonders gravierend muss die hohe Rate missgebildeter Kälber angesehen werden, die in den untersuchten Betrieben bei 3,3 % lag, wohingegen sie im Normalfall in anderen deutschen Betrieben 0,2 – 1 % ausmacht. Ein weiterer gravierender Einfluss muss von der vorhandenen bovinen Virusdiarrhoe (BVD) abgeleitet werden, die in allen Betrieben stichprobenmäßig festgestellt wurde. Eine systemati-

sche Erfassung, die diese negative Beurteilung noch stützen könnte, wurde leider nicht durchgeführt. Der bovinen Virusdiarrhoe wird ein großer Einfluss auf psychologische Parameter beigemessen, wobei auch eine beobachtete Veränderung des Verhaltens der Tiere auf diesen Einflussfaktor zurückgeführt werden könnte. Die Studie hat statistisch nicht signifikante Unterschiede zwischen exponierten und Kontrolltieren, Unterschiede in der Wiederkau-Frequenz und -dauer bei Weidehaltung sowie der Melatoninkonzentration festgestellt. Daher war die Erhebung derartiger Veränderungen sehr unklar. Die Unterschiede beruhen z.B. in der Wiederkau-Frequenz und -dauer auf Beobachtungen an jeweils 2 Tagen in insgesamt 8 Betrieben, wobei in nur in 2 Fällen auch auf den Weiden eine Expositionsmessung stattgefunden hat, ansonsten wurde auf Messungen in den Ställen zurückgegriffen. Die Befunde in Bezug auf die Variation der Konzentration des Hormons Melatonin sind ebenfalls schwer zu interpretieren, da im Gegensatz zu bisherigen Berichten eine Erhöhung der Melatoninkonzentration unter dem Einfluss elektromagnetischer Felder gefunden wurde. Möglicherweise spielen hier unterschiedliche Lichtverhältnisse bei den Tieren in Stall- bzw. Weidehaltung eine große Rolle. Die Lichtverhältnisse haben bekanntlich einen Einfluss auf die Melatoninproduktion; sie wurden in dieser Messung nicht berücksichtigt und erfasst. Die Studie zeigt insgesamt schwerwiegende methodische Mängel; weder das Studiendesign noch die Durchführung der Untersuchung zeugt von einer sorgfältigen Planung, die erforderlich wäre, um eine Aussage zu der gestellten Fragestellung gewinnen zu können.

11. Literaturverzeichnis

11.1 Literaturverzeichnis zu Kapitel 4

Bernardi P, Cavagnaro M, Pisa S (1997): Evaluation of the SAR distribution in the human head for cellular phones used in a partially closed environment. IEEE Transactions on electromagnetic compatibility; 38(3):357-366

Bochtler U, Eidher R, Wuschek M (2003): Großräumige Ermittlungen von Funkwellen in Baden-Württemberg. Messergebnisse Untersuchungsgebiet Freiburg. Botronic GmbH, Stuttgart

Brose J, Lindenmeier H, Hopf J (1994): Feldstärkeverteilung im Kfz-Innenraum, hervorgerufen durch die bordeigene Funktelefonanlage. Kleinheubacher Berichte, Band 37, ISSN 0343-5725

Dimbylow PJ, Mann SM (1994): SAR calculations in an anatomically realistic model of the head for mobile communication transceivers at 900 MHz and 1.8 GHz. Phys. Med. Biol. 39 (1994), 1537-1553

Ergebnisse "Bundesweite EMVU-Meßaktion 1996/97" (1997). Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post; <http://regtp.de>

Gandhi OP, Lazzi G, Tinniswood A, Yu QS (1999b): Comparison of numerical and experimental methods for determination of SAR and radiation patterns of handheld wireless telephones. Bioelectromagnetics, Suppl. 4, 93-101

Gandhi OP, Gu YG, Chen JY, Bassen HI (1999a): SAR and induced current distributions in a high-resolution anatomically based model of a human for plane-wave exposure 100-915 MHz. Health Physics, 63, 281-290

Garn H, Kremser H, Neubauer G (1994): Beurteilung der Strahlungsexposition bei D-Netz-Hand-Mobilfunktelefonen. Frequenz; 48(7-8):153-162

Hombach V, Meier K, Burkhardt M, Kühn E, Kuster N (1996): The dependence of EM energy absorption upon human head modeling at 900 MHz. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 44, No. 10, 1865-1873

Kuster N, Schmid T, Meier K (1993): Studies of absorption in the extreme near field of transmitters. Proc. VDE Meeting, Mannheim

Malek A, Seier W, TÜV Österreich (1999): Prüfbericht TÜV Nr. M/EMV-99/201E über die Messung elektromagnetischer Felder in Feldbach

Malek A, Seier W, TÜV Österreich (1999): Prüfbericht TÜV Nr. M/EMV-99/211 über die Messung elektromagnetischer Felder in A-6481 St. Leonhard im Pitztal, Zaunhof, Ausserlehn 17

Malek A, Seier W, TÜV Österreich (1998): Prüfbericht TÜV Nr. M/EMV-98/302E über die Messung der elektromagnetischen Felder in A-1180 Wien, Gersthoferstraße 125

- Martens L, DeMoerloose J, DeZutter D, DePoorter J, DeWagter C (1995): Calculation of the electromagnetic fields induced in the head of an operator of a cordless telephone. *Radio Science* 1995; 30(1):283-290
- Matzke G, Meisel H, Sauer E (2003): Messbericht und gutachterliche Stellungnahme Nr. 02/2235-2. Immissionsschutz-Messungen (Mobilfunk) in Schwerin, im Auftrag des Umweltamtes der Stadt Schwerin, EMV Services, ein Unternehmen der TÜV Nord Gruppe, Harburger Schloss-Straße 6-12, 21079 Hamburg
- Neubauer G, Neumann W, Austrian Research Centers Seibersdorf (1999 a): Gutachten Nr. EE-EMV-S 76/79 über Elektromagnetische Felder im Siemensgebäude Gudrunstraße 11, A-1100 Wien
- Neubauer G, Neumann W, Austrian Research Centers Seibersdorf (1999 b): Gutachten Nr. EE-EMV-S-85/99 über Elektromagnetische Felder in A-3430 Tulln und in A-3430 Mollersdorf
- Nießen P (2002): Gutachten zur EMVU-Belastung durch das WLAN, nova-Institut für Ökologie und Innovation, EMF-Abteilung, Goldenbergstr. 2, 50354 Hürth. Erstellt im Auftrag der Universität Bremen, Hürth, 2001
- Riu PJ, Foster KR (1999): Heating of tissue by near-field exposure to a dipole: a model analysis. *IEEE Trans Biomed Eng*; 46(8):911-917
- Taki M, Watanabe S (1996): FDTD Analysis of electromagnetic interaction between portable telephone and human head. *IEICE Trans Electron* ; E79-C(10):1300-1306
- Tegenfeld C (1999): Radiation from popular cellular phones. Internet Link: www.bemi.se/founder/clips/cellularSar.html
- Van de Kamer JB, Lagendijk JJ (2002): Computation of high-resolution SAR distributions in a head due to a radiating dipole antenna representing a hand-held mobile phone. *Phys Med Biol*, 47 (10): 1827 - 1835
- Van Leeuwen GMJ, Lagendijk JJW, van Leersum BJAM, Zwamborn APM, Hornsleth SN, Kotte ANTJ (1999): Calculation of change in brain temperatures due to exposure to a mobile phone. *Phys Med Biol* 44, No. 10, 2367-2379
- Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV - (1997)
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn
- Wuschek M (2003): Ergebnisbericht über die Messung elektromagnetischer Felder in der Umgebung von Mobilfunksendeanlagen. EM-Institut, Carlstr. 4, 93049 Regensburg. Erstellt im Auftrag der Stadt Nürnberg, Umweltamt, Regensburg, Juli 2003
- Wuschek M (2000): Messtechnische Ermittlung hochfrequenter elektromagnetischer Felder an repräsentativen Orten in Schleswig-Holstein. Erstellt im Auftrag des Staatlichen Umweltamtes Kiel von der Ingenieurgemeinschaft für Geowissenschaften und Umwelttechnik, München, November 2000

Wuschek M (1999): Hochfrequente elektromagnetische Felder in der Umgebung einer Sendeanlage für VEW- und Mobilfunk in Marktgemeinde Schopfloch, Landkreis Ansbach (Mfr.). Messprotokolle erstellt im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen

11.2 Literaturverzeichnis zu den Kapiteln 5 bis 10

Adey WR, Byus CV, Cain CD, Higgins RJ, Jones RA, Kean CJ, Kuster N, MacMurray A, Stagg RB, Zimmerman G (2000): Spontaneous and nitrosourea-induced primary tumors of the central nervous system in Fischer 344 rats exposed to frequency-modulated microwave fields. *Cancer Res* 60(7):1857-1863

Adey WR, Byus CV, Cain CD, Higgins RJ, Jones RA, Kean CJ, Kuster N, MacMurray A, Stagg RB, Zimmerman G, Phillips JL, Haggren W (1999): Spontaneous and nitrosourea-induced primary tumors in Fischer 344 rats chronically exposed to 836 MHz modulated microwaves. *Radiat Res* 152:293-302

Altpeter ES, Pfluger D, Krebs T, von Känel J, Stärk K, Griot C (1995): Gesundheitliche Auswirkungen des Kurzwellensenders Schwarzenburg, ausgeführt durch das Institut für Sozial- und Präventivmedizin der Universität Bern (Schweiz), im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft (Schweiz). BEW-Schriftenreihe Studie Nr. 56

Auvinen A, Hietanen M, Luukkonen R, Koskela RS (2002): Brain tumors and salivary gland cancers among cellular telephone users. *Epidemiology*, 13 (3): 356 - 359

Bartsch H, Bartsch C, Seebald E, Deerberg F, Dietz K, Vollrath L, Mecke D (2002): Chronic exposure to a GSM-like signal (mobile phone) does not stimulate the development of DMBA-induced mammary tumors in rats: results of three consecutive studies. *Radiat Res*, 157 (2): 183 - 190

Barbaro V; Bartolini P, Donato A, Militello C, Altamura G, Ammirati F, Santini M (1995): Do European GSM Mobile cellular phones pose a potential risk to pacemaker patients? *Pacing Clin Electrophysiol* 1995, 18(6): 1218-1224

Beason RC, Semm P (2002): Responses of neurons to an amplitude modulated microwave stimulus. *Neurosci Lett*, 333 (3):175 - 178

Bisht KS, Moros EG, Straube WL, Baty JD, Roti Roti JL (2002): The effect of 835.62 MHz FDMA or 847.74 MHz CDMA modulated radiofrequency radiation on the induction of micronuclei in C3H 10T(1/2) cells. *Radiat Res*, 157 (5): 506 - 515

Borbély AA, Huber R, Graf T, Fuchs B, Gallamm E, Achermann P (1999): Pulsed high-frequency electromagnetic field affects human sleep and sleep electroencephalogram. *Neuroscience Letters* 275:207-210

Bornhausen M, Scheingraber H (2000): Prenatal exposure to 900 MHz, cell-phone electromagnetic fields had no effect on operant-behavior performances of adult rats. *Bioelectromagnetics*, 21 (8): 566 - 574

- Braune S, Wrocklage C, Raczek J, Gailus T, Lucking CH (1998). Resting blood pressure increase during exposure to a radiofrequency electromagnetic field. *Lancet*, 351, 207
- Byus CV, Hawel L (1997): Additional considerations about bioeffects. In: *Mobile Communications Safety* (Balzano Q and Lin JC, Eds.) London, Chapman and Hall:133
- Cain CD, Thomas DL, Adey WR (1997): Focus formation of C3H/10T1/2 cells and exposure to a 836.55 MHz modulated radiofrequency field. *Bioelectromagnetics*; 18(3):237-243
- Chagnaud J-L, Moreau J-M, Veyret B (1999): No effect of short-term exposure to GSM-modulated low-power microwaves on benzopyrene-induced tumours in rat. *Int J Radiat Biol*, 75(10):1251-1256
- Chou CK, Guy AW, Kunz LL, Johnson RB, Crowley JJ, Krupp JH (1992): Long-term, low-level microwave irradiation of rats. *Bioelectromagnetics*, 13:469
- Cleary SF, Cao G, Liu LM (1996): Effects of isothermal 2450 MHz microwave radiation on the mammalian cell cycle: comparison with effects of isothermal 27 MHz radiofrequency radiation exposure. *Bioelectrochem Bioenerget*, 39:167
- Croft RJ, Chandler JS, Burgess AP, Barry RJ, Williams JD, Clarke AR (2002): Acute mobile phone operation affects neural function in humans. *Clin Neurophysiol*, 113 (10): 1623-1632
- d'Ambrosio G, Massa R, Scarfi MR, Zeni O (2002): Cytogenetic damage in human lymphocytes following GSM phase modulated microwave exposure. *Bioelectromagnetics*, 23(1):7-13
- de Seze R, Ayoub J, Peray P, Miro L, Touitou Y (1999): Evaluation in humans of the effects of radiocellular telephones on the circadian patterns of melatonin secretion, a chronobiological rhythm marker. *J Pineal Res*; 27(4):237-242
- de Seze R, Fabbro-Peray P, Miro L (1998): GSM radiocellular telephones do not disturb the secretion of antepituitary hormones in humans. *Bioelectromagnetics*; 19(5):271-278
- Dolk H, Shaddick G, Walls P, Grundy C, Thakrar B, Kleinschmidt I, Elliott P (1997): Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain. I. Sutton Coldfield transmitter. *Am J Epidemiol*; 145(1):1-9
- Dubreuil D, Jay T, Edeline JM (2003): Head-only exposure to GSM 900-MHz electromagnetic fields does not alter rat's memory in spatial and non-spatial tasks. *Behav Brain Res*, 145 (1-2): 51-61
- Dubreuil D, Jay T, Edeline JM (2002): Does head-only exposure to GSM-900 electromagnetic fields affect the performance of rats in spatial learning tasks? *Behav Brain Res*, 129 (1-2): 203 - 210
- Dutta SK, Subramoniam A, Ghosh B, Parshad R (1984): Microwave radiation induced calcium ion efflux from human neuroblastoma cells in culture. *Bioelectromagnetics* 5:71
- Edelstyn N, Oldershaw A (2002): The acute effects of exposure to the electromagnetic field emitted by mobile phones on human attention. *Neuroreport*, 13 (1):119-121
- Elshershari H, Celiker A, Özer S, Özme S (2002): Influence of D-Net (EUROPEAN GSM-Standard) Cellular Telephones on Implanted Pacemakers in Children. *PACE*, 25 (9): 1328-1330

Epidemiologische Studien zu Gesundheitsrisiken durch Hochfrequenzstrahlung. Bestandsaufnahme, Empfehlungen und Bewertung verschiedener Ansätze zur Untersuchung möglicher Effekte von Sendetürmen, Basisstationen des Mobilfunks und Mobiltelefonen auf das Auftreten von Tumoren im Kopfbereich und Leukämien (1998). Institut für Medizinische Statistik und Dokumentation der Universität Mainz, Deutsches Krebsforschungszentrum Heidelberg

Eulitz C, Ullsperger P, Freude G, Elbert T (1998): Mobile phones modulate response patterns of human brain activity. *NeuroReport* 9 (14):3229-3232

Finnie JW, Blumbergs PC, Manavis J, Utteridge TD, Gebiski V, Davies RA, Vernon-Roberts B, Kuchel TR (2002): Effect of long-term mobile communication microwave exposure on vascular permeability in mouse brain. *Pathology*, 34 (4):344-347

Forschungszentrum für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit (femu) (2003): Wissensbasierte Literaturdatenbank. Zugänglich unter <http://www.femu.rwth-aachen.de>

Frei MR, Berger RE, Dusch SJ, Guel V, Jauchem JR, Merritt JH, Stedham MA (1998a): Chronic exposure of cancer-prone mice to low-level 2450 MHz radiofrequency radiation. *Bioelectromagnetics*, 19 (1): 20–31

Frei MR, Jauchem JR, Dusch SJ, Merritt JH, Berger RE, Stedham MA (1998b): Chronic, low-level (1.0 W/kg) exposure of mice prone to mammary cancer to 2450 MHz microwaves. *Radiat Res*, 150(5):568-576

Frey AH (1998b): Headaches from cellular telephones: are they real and what are the implications?. *Environ Health Perspect*, 106 (3):101-103

Freude G, Ullsperger P, Eggert S, Ruppe I (2000): Microwaves emitted by cellular telephones affect human slow brain potentials. *Eur J Appl Physiol* 81:18-27

Freude G, Ullsperger P, Eggert S, Ruppe I (1998): Effects of microwaves emitted by cellular phones on human slow brain potentials. *Bioelectromagnetics*, 19:384-387

Fritze K, Sommer C, Schmitz B, Mies G, Hossman K-A, Kiessling M, Wiesner C (1997a): Effect of global system for mobile communication (GSM) microwave exposure on blood-brain permeability in rat. *Acta neuropathol*, 94:465-470

Fritze K, Wiessner CG, Kuster N, Sommer C, Gass P, Hermann DM, Kiessling M, Hossmann KA (1997): Effect of global system for mobile communication microwave exposure on the genomic response of the rat brain. *Neuroscience* 81(3):627-639

Fritzer G, Friege L, Göder R, Pannier G, Wachter J, Aldenhoff J (2000): Kurz- und Langzeitauswirkung elektromagnetischer Hochfrequenzfelder auf die Qualität des menschlichen Schlafes und der hieraus resultierenden Tagesempfindlichkeit. Studie der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie der Universität Kiel, Schlafmedizinisches Labor

Gehlen W, Spittler JF, Calabrese P, Truong MK, Cohrs U, Heidrich M, Reinhard A (1996): Biologisch-zerebrale Effekte in niederfrequent gepulsten Hochfrequenzfeldern. *Edition Wissenschaft* 12 (3):3-27

- Gandhi OP, Gu Y-g, Chen J-Y, Bassen H (1992): Specific absorption rates and induced current distributions in an anatomically based human model for plane-wave exposures. *Health Phys.* 63(3):281-290
- Goswami PC, Albee LD, Parsian AJ, Baty JD, Moros EG, Pickard WF, Roti Roti JL, Hunt CR (1999): Protooncogene mRNA levels and activities of multiple transcription factors in C3H101/2 murine embryonic fibroblasts exposed to 835.62 and 847.74 MHz cellular phone communication frequency radiation. *Radiat Res*, 151:300-309
- Hansson Mild K, Oftedal G, Sandström M, Wilén J, Tynes T, Haugsdal B, Hauger E (1998): Comparison of symptoms experienced by users of analogue and digital mobile phones. A Swedish-Norwegian epidemiological study. *Arbetslivsrapport 1998:23*. Solna, Sweden, Arbetslivsinstitutet
- Haarala C, Bjornberg L, Ek M, Laine M, Revonsuo A, Koivisto M, Hamalainen H (2003): Effect of a 902 MHz electromagnetic field emitted by mobile phones on human cognitive function: A replication study. *Bioelectromagnetics*, 24 (4):283-288
- Hamblin DL, Wood AW (2002): Effects of mobile phone emissions on human brain activity and sleep variables. *Int J Radiat Biol*, 78 (8):659-669
- Hardell L, Hansson Mild K, Carlberg M (2003): Further aspects on cellular and cordless telephones and brain tumours. *Int J Oncol*, 22 (2):399-407
- Hardell L, Hansson Mild K, Sandstrom M, Carlberg M, Hallquist A, Pahlson A (2003): Vestibular schwannoma, tinnitus and cellular telephones. *Neuroepidemiology*, 22(2):124-129
- Hardell L, Hansson Mild K, Carlberg M (2002a): Case-control study on the use of cellular and cordless phones and the risk for malignant brain tumours. *Int J Radiat Biol*, 78 (10):931-936
- Hardell L, Hallquist A, Hansson Mild K, Carlberg M, Pahlson A, Lilja A (2002b): Cellular and cordless telephones and the risk for brain tumours. *Eur J Cancer Prev*, 11(4):377-386
- Hardell L, Nasman A, Pahlson A, Hallquist A (2000): Case-control study on radiology work, medical X-ray investigations, and use of cellular telephones as risk factors for brain tumors. *MedGenMed* May 4;:E2
- Hardell L, Nasman A, Pahlson A, Hallquist A, Hansson Mild K (1999): Use of cellular telephones and the risk for brain tumours: A case-control study. *Int J Oncol* 15(1):113-116
- Heikkinen P, Kosma VM, Alhonen L, Huuskonen H, Komulainen H, Kumlin T, Laitinen JT, Lang S, Puranen L, Juutilainen J (2003): Effects of mobile phone radiation on UV-induced skin tumourigenesis in ornithine decarboxylase transgenic and non-transgenic mice. *Int J Radiat Biol*, 79(4):221-233
- Heikkinen P, Kosma VM, Hongisto T, Huuskonen H, Hyysalo P, Komulainen H, Kumlin T, Lahtinen T, Lang S, Puranen L, Juutilainen J (2001): Effects of mobile phone radiation on X-ray-induced tumorigenesis in mice. *Radiat Res*, 156(6):775-785
- Hekmat K, Kanani R, Ahmadpour R, Lauterbach G, Südkamp M, Weber HJ, de Vivie ER (2002): Haben Mobiltelefone einen negativen Einfluss auf moderne Herzschrittmacher? *Kardiotechnik*, (2):45-47

- Hietanen M, Hamalainen AM, Husman T (2002): Hypersensitivity symptoms associated with exposure to cellular telephones: No causal link. *Bioelectromagnetics*, 23(4):264-270
- Higashikubo R, Ragouzis M, Moros EG, Straube WL, Roti Roti JL (2001): Radiofrequency electromagnetic fields do not alter the cell cycle progression of C3H 10T and U87MG cells. *Radiat Res*, 156(6):786-795
- Higashikubo R, Culbreath VO, Spitz DR, LaRegina MC, Pickard WF, Straube WL, Moros EG, Roti Roti JL (1999): Radiofrequency electromagnetic fields have no effect on the in vivo proliferation of the 9L brain tumour. *Radiat Res*, 152(6):665-671
- Hocking B (1998): Preliminary report: Symptoms associated with mobile phone use. *Occup Med (Lond)*; 48(6):357-360
- Hocking B, Gordon IR, Grain HL, Hatfield GE (1996): Cancer incidence and mortality and proximity to TV towers. *Med J Aust*; 165(11-12):601-602
- Hofgärtner F, Müller Th, Sigel F (1996): Können Mobil-Telefone im C- und D-Netz Herzschrittmacher-Patienten gefährden? *Dtsch Med Wochenschr* 121 (20):646-652
- Imaida K, Taki M, Yamaguchi T, Ito T, Watanabe S, Wake K, Aimoto A, Kamimura Y, Ito N, Shirai T (1998a): Lack of promoting effects of the electromagnetic near-field used for cellular phones (929.2 MHz) on rat liver carcinogenesis in a medium-term liver bioassay. *Carcinogenesis*, 19(2):311-314
- Imaida K, Taki M, Watanabe S-i, Kamimura Y, Ito T, Yamaguchi T, Ito N, Shirai T (1998b): The 1.5 GHz electromagnetic near-field used for cellular phones does not promote rat liver carcinogenesis in a medium-term liver bioassay. *Jpn J Cancer Res*, 89(10):995-1002
- Inskip PD, Tarone RE, Hatch EE, Wilcosky TC, Shapiro WR, Selker RG, Fine HA, Black PM, Loeffler JS, Linet MS (2001): Cellular-telephone use and brain tumors. *N Engl J Med*; Vol. 344, No. 2:79-86
- Irnich W, Batz L, Müller R, Tobisch R (1996): Electromagnetic interference of pacemakers by mobile phones. *Pacing Clin Electrophysiol* 19 (10):1431-1446
- Ivaschuk OI, Jones RA, Ishida-Jones T, Haggren W, Adey WR, Phillips JI (1997): Exposure of nerve growth factor-treated PC-12 rat pheochromocytoma cells to a modulated radiofrequency field at 836.55 MHz: effects on c-jun and c-fos expression. *Bioelectromagnetics*, 18:223-229
- Johansen C, Boice Jr JD, McLaughlin JK, Christensen HC, Olsen JH (2002a): Mobile phones and malignant melanoma of the eye. *Br J Cancer*, 86 (3): 348-349
- Johansen C, Feychting M, Moller M, Arnsbo P, Ahlbom A, Olsen JH (2002d): Risk of severe cardiac arrhythmia in male utility workers: a nationwide danish cohort study. *Am J Epidemiol*, 156 (9): 857-861
- Johansen C, Boice JD, McLaughlin JK, Olsen JH (2001): Cellular telephones and cancer-a nationwide cohort study in Denmark. *Journal of the National Cancer Institute*, Vol. 93, No. 3:203-207

- Kittel A, Siklow L, Thuroczy G, Somosy Z (1996): Qualitative enzyme histochemistry and microanalysis reveal changes in ultra-structural distribution of calcium and calcium-activated ATPases after Microwave irradiation of the medial habenula. *Acta Neuropathol*, 92:362
- von Klitzing L (1995): Low-Frequency pulsed electromagnetic fields influence EEG of man. *Physica Medica XI (2)*:77-80
- Koivisto M, Haarala C, Krause CM, Revonsuo A, Laine M, Hamalainen H (2001): GSM phone signal does not produce subjective symptoms. *Bioelectromagnetics*, 22 (3): 212-215
- Koivisto M, Revonsuo A, Krause CM, Haarala C, Sillanmäki L, Laine M, Hämäläinen H (2000): Effects of 902 MHz electromagnetic Field emitted by cellular phones on response times in humans. *NeuroReport*, 11:413-415
- Koyama S, Nakahara T, Wake K, Taki M, Isozumi Y, Miyakoshi J (2003): Effects of high frequency electromagnetic fields on micronucleus formation in CHO-K1 cells. *Mutat Res*, 541 (1-2): 81 – 89
- Krause CM, Sillanmäki L, Koivisto M, Häggqvist A, Saarela C, Revonsuo A, Laine M, Hämäläinen H (2000): Effects of electromagnetic field emitted by cellular phones on the EEG during memory task. *NeuroReport*, 11:761-764
- Kues HA, Monahan JC, D'Anna SA, McLeod DS, Luty GA, Koslov S (1992b): Increased sensitivity of the non-human primate eye to microwaveradiation following ophthalmic drug pretreatment. *Bioelectromagnetics*, 13:379
- Kwee S, Raskmark P (1998): Changes in cell proliferation due to environmental non-ionizing radiation 2. Microwave radiation. *Bioelectrochem Bioenerg*, 44 (2):251-255
- Lai H, Singh NP (1996): Single- and double-strand DNA-breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequencyelectromagnetic radiation. *Int J Radiat Biol*, 69:513-521
- Lai H, Singh NP (1995): Acute low-intensity microwave exposure increases DNA-single-strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics*, 16:207-210
- Lai H, Horita A, Guy AW (1994): Microwave irradiation affects radial-arm maze performance in the rat. *Bioelectromagnetics*, 15:95
- Lai H, Carino MA, Horita A, Guy AW (1992a): Single vs. repeated microwave exposure: effects on benzodiazepine receptors in the brain of the rat. *Bioelectromagnetics* 13 (1): 57-66
- Lai H, Carino MA, Horita A, Guy AW (1992b): Opioid receptor subtypes that mediate a microwave-induced decrease in central cholinergic activity in the rat. *Bioelectromagnetics* 13 (3):237-246
- La Regina M, Moros EG, Pickard WF, Straube WL, Baty J, Roti Roti JL (2003): The Effect of Chronic Exposure to 835.62 MHz FDMA or 847.74 MHz CDMA Radiofrequency Radiation on the Incidence of Spontaneous Tumors in Rats. *Radiat Res*, 160 (2):143-151
- Li L, Bisht KS, LaGroye I, Zhang P, Straube WL, Moros EG, Roti Roti JL (2001): Measurement of DNA damage in mammalian cells exposed in vitro to radiofrequency fields at SARs of 3-5 W/kg. *Radiat Res*, 156 (3):328-332

- Litovitz TA, Krause D, Penafiel M, Elson EC, Mullins JM (1993): The role of coherence time in the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity. *Bioelectromagnetics*, 14:395
- Lu S-H, Mathur SP, Stuck B, Zwick H, D'Andrea JM, Merritt JH, Luty G, McLeod DS, Johnson M (2000): Effects of high peak power microwaves on the retina of the rhesus monkey. *Bioelectromagnetics* 21(6):439-454
- Maes A, Collier M, Van Gorp U, Vandoninck S, Verschaeve L (1997): Cytogenetic effects of 935.2-MHz (GSM) microwaves alone and in combination with mitomycin. *Mutat Res* 393 (1-2):151-156
- Maes A, Collier M, Slaets D, Verschaeve L (1996): 954 MHz microwaves enhance the mutagenic properties of mitomycin C. *Eviron Mol Mutagen*, 28:26
- Maes A, Collier M, Slaets D, Verschaeve L (1995): Cytogenetic effects of microwaves from mobile communication frequencies (954 MHz). *Electro-Magnetobiology*, 14, 91
- Maes A, Verschaeve L, Arroyo A, De Wagter C, Vercruyssen L (1993): In vitro cytogenetic effects of 2450 MHz waves on human peripheral blood lymphocytes. *Bioelectromagnetics*, 14:495
- Malyapa RS, Ahern EW, Bi C, Straube WL, LaRegina M, Pickard WF, Roti Roti JL (1998): DNA damage in rat brain cells after in vivo exposure to 2450 MHz electromagnetic radiation and various methods of euthanasia. *Radiat Res*, 149, 637
- Manikowska-Czerska E, Czerski P, Leach WM (1985): Effects of 2.45 GHz microwaves on meiotic chromosomes of male CBA/CAY mice. *J Hered*, 76, 71
- Mann K, Wagner P, Brunn G, Hassan F, Hiemke C, Roeschke J (1998): Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on the neuroendocrine system. *Neuroendocrinology* 67 (2):139-144
- Mann K, Roeschke J (1996): Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on human sleep. *Neuropsychobiology* 33(1):41-47
- Mashevich M, Folkman D, Kesar A, Barbul A, Korenstein R, Jerby E, Avivi L (2003): Exposure of human peripheral blood lymphocytes to electromagnetic fields associated with cellular phones leads to chromosomal instability. *Bioelectromagnetics*, 24(2):82-90
- McNamee JP, Bellier PV, Gajda GB, Miller SM, Lemay EP, Lavalley BF, Marro L, Thansandote A (2002): DNA damage and micronucleus induction in human leukocytes after acute in vitro exposure to a 1.9 GHz continuous-wave radiofrequency field. *Radiat Res*, 158(4):523-533
- Mickley GA, Cobb BL, Mason PA, Farrell S (1994): Disruption of a putative working memory task and selective expression of brain c-fos following microwave-induced hyperthermia. *Physiol Behav.*, 55:1029
- Morrissey JJ, Raney S, Heasley E, Rathinavelu P, Dauphnee M, Fallon JH (1999): Iridium exposure increases c-fos expression in the mouse brain only at levels which likely result in tissue heating. *Neuroscience*, 92:1539

- Muscat JE, Malkin MG, Shore RE, Thompson S, Neugut AI, Stellman SD, Bruce J (2002): Handheld cellular telephones and risk of acoustic neuroma. *Neurology*, 58 (8): 1304-1306
- Muscat JE, Malkin MG, Thompson S, Shore RE, Stellman SD, McRee D, Neugut AI, Wynder EL (2000): Handheld cellular telephone use and risk of brain cancer. *JAMA* Vol 284(23):3001-3007
- Nowak B, Rosocha S, Zellerhoff C, Liebrich A, Himmrich E, Voigtlander T, Meyer J (1996): Is there a risk for interaction between mobile phones and single lead VDD pacemakers? *Pacing Clin Electro-physiol* 19 (10):1447-1450
- Oftedal G, Wilén J, Sandström M, Hansson Mild K (2000): Symptoms experienced in connection with mobile phone use. *Occup Med (Lond)*, 50(4):237-245
- Penafiel LM, Litovitz T, Krause D, Desta A, Mullins JM (1997): Role of modulation on the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity in L929 cells. *Bioelectromagnetics*, 13:131
- Phillips JL, Ivaschuk O, Ishida-Jones T, Jones RA, Campbell-Beachler M, Haggren W (1999): DNA damage in Molt-4 T-lymphoblastoid cells exposed to cellular telephone radiofrequency fields in vitro. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 45(1):103-110
- Preece AW, Iwi G, Davies-Smith A, Wesnes K, Butlers S, Lim E, Valey A (1999): Effect of a 915-MHz simulated mobile phone signal on cognitive function in man. *Int J Radiat Biol* 75(4):447-456
- Reiser H, Dimpfel W, Schober F (1995): The influence of electromagnetic fields on human brain activity. *Eur J Med Res* Oct 16; 1(1):27-32
- Repacholi MH, Basten A, Gebiski V, Noonan D, Finnie J, Harris AW (1997): Lymphomas in E μ -Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Radiat Res* 147 (5):631-640
- Röschke J, Mann K (1997): No short-term effects of digital mobile radio telephone on the awake human electroencephalogram. *Bioelectromagnetics*, 18:172-176
- Rothman KJ, Loughlin JE, Funch DP, Dreyer NA (1996): Overall mortality of cellular telephone customers. *Epidemiology* 7 (3):303-305
- Salford LG, Brun AE, Eberhardt JL, Malmgren L, Persson BR (2003): Nerve Cell Damage in Mammalian Brain after Exposure to Microwaves from GSM Mobile Phones. *Environ Health Perspect*, 111 (7):881-883
- Salford LG, Brun A, Stureson K, Eberhardt JL, Persson BR (1994): Permeability of the blood-brain barrier induced by 915 MHz electromagnetic radiation, continuous wave and modulated at 8, 16, 50, and 200 Hz. *Microsc Res Tech* 27 (6):535-542
- Salford LG, Brun A, Eberhardt JL, Persson BR (1993): Experimental studies of brain tumour development during exposure to continuous and pulsed 915 MHz radiofrequency radiation. *Bioelectrochem Bioener* 30:293-302
- Sandström M, Wilén J, Oftedal G, Hansson Mild K (2000): Mobile phone use and subjective symptoms. Comparison of symptoms experienced by users of analogue and digital mobile phones. *Occup Med* 51 (1):25-35

- Santini R, Santini P, Le Ruz P, Danze JM, Seigne M (2003): Survey study of people living in the vicinity of cellular phone base stations *Electromagnetic Biology and Medicine*, 22 (1):41-49
- Sarkar S, Ali S, Behari J (1994): Effect of low power microwave on the mouse genome: a direct DNA analysis. *Mutat Res*, 320:41
- Stagg RB, Thomas WJ, Jones RA, Adey WR (1997): DNA synthesis and cell proliferation in C6 glioma and primary glial cells exposed to a 836.55 MHz modulated radiofrequency field. *Bioelectromagnetics*, 18:230
- Stang A, Anastassiou G, Ahrens W, Bromen K, Bornfeld N, Jöckel K.-H. (2001): The possible role of radiofrequency radiation in the development of uveal melanoma. *Epidemiology* Vol. 12(1):1-6
- Sykes PJ, McCallum BD, Bangay MJ, Hooker AM, Morley AA (2001): Effect of exposure to 900 MHz radiofrequency radiation on intrachromosomal recombination in pKZ1 mice. *Radiat Res*, 156 (5 Pt 1):495-502
- Takahashi S, Inaguma S, Cho YM, Imaida K, Wang J, Fujiwara O, Shirai T (2002): Lack of mutation induction with exposure to 1.5 GHz electromagnetic near fields used for cellular phones in brains of Big Blue mice. *Cancer Res*, 62 (7): 1956-1960
- Toler JC, Shelton WW, Frei MR, Merritt JH, Stedham MA (1997): Long-term, low-level exposure of mice prone to mammary tumours to 435 MHz radiofrequency radiation. *Radiat Res*, 148:227-234
- Utteridge TD, Gebiski V, Finnie JW, Vernon-Roberts B, Kuchel TR (2002): Long-term exposure of Emu-Pim1 transgenic mice to 898.4 MHz microwaves does not increase lymphoma incidence. *Radiat Res*, 158 (3):357-364
- Vijayalaxmi , Bisht KS, Pickard WF, Meltz ML, Roti Roti JL, Moros EG (2001): Chromosome damage and micronucleus formation in human blood lymphocytes exposed in vitro to radiofrequency radiation at a cellular telephone frequency (847.74 MHz, CDMA). *Radiat Res*, 156 (4):430-433
- Vijayalaxmi DZ, Frei MR, Dusch SJ, Guel V, Meltz ML, Jauschem JR (1997a): Frequency of micronuclei in the peripheral blood and bone marrow of cancer-prone mice chronically exposed to 2450-MHz radiofrequency radiation. *Radiat.Res*, 147:495
- Volmer K, Hecht W, Herzog A, Wenzel C, Wöhr A-C, Klempt M, Unsheim J, Wuschek M (2000): Untersuchungen zum Einfluss elektromagnetischer Felder von Mobilfunkanlagen auf Gesundheit, Leistung und Verhalten von Rindern. Bericht 2000, erstellt im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen.
- Wagner P, Roeschke J, Mann K, Fell J, Hiller W, Frank C, Grozinger M (2000): Human sleep EEG under the influence of pulsed radio frequency electromagnetic fields. Results from polysomnographies using submaximal high power flux densities. *Neuropsychobiology*, 42 (4):207-212
- Wagner P, Roeschke J, Mann K, Hiller W, Frank C (1998): Human sleep under the influence of pulsed radiofrequency electromagnetic fields: a polysomnographic study using standardized conditions. *Bioelectromagnetics* 19 (3):199-202

Warren HG, Prevatt AA, Daly KA, Antonelli PJ (2003): Cellular telephone use and risk of intratemporal facial nerve tumor. *Laryngoscope*, 113 (4): 663-667

Wilén J, Sandstrom M, Hansson Mild K (2003): Subjective symptoms among mobile phone users-A consequence of absorption of radiofrequency fields? *Bioelectromagnetics*, 24 (3): 152-159

Wilke A, Grimm W, Funck R, Maisch B (1996): Influence of D-net (European GSM-Standard) cellular phones on pacemaker function in 50 patients with permanent pacemakers. *Pacing Clin Electrophysiol* 19(10):1456-1458

Wu RY, Chiang H, Shao BJ, Li NG, Fu YD (1994): Effects of 2.45 GHz microwave radiation and phorbol ester 12-O-tetradecanoylphorbol-13-acetate on dimethylhydrazine-induced colon cancer in mice. *Bioelectromagnetics*, 15:531

Yamaguchi H, Tsurita G, Ueno S, Watanabe S, Wake K, Taki M, Nagawa H (2003): 1439 MHz pulsed TDMA fields affect performance of rats in a T-maze task only when body temperature is elevated. *Bioelectromagnetics*, 24 (4):223-230